

RESISTÊNCIA AO FOGO DE ESTRUTURAS DE BETÃO. MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS TABELADOS E SIMPLIFICADOS E APLICAÇÃO A UM PROJECTO

NUNO BENTO TEIXEIRA GUIMARÃES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues
Gonçalves

JUNHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

A sorte favorece os audazes

Erasmus

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Miguel Chichorro Gonçalves, pelo tema proposto, pela grande disponibilidade oferecida, por ter criado todas as condições para a realização do trabalho e pelo entusiasmo demonstrado.

A Engenheira Alzira Ramalho pelo projecto de estudo e o feedback da utilização do programa.

Ao aluno de Mestrado de Engenharia Informática, Mário Carneiro, pela paciência e ajuda.

E a todos os meus amigos que incentivaram e ajudaram durante o tempo de realização deste trabalho o meu mais sincero obrigado

RESUMO

A regulamentação em vigor em Portugal (RJ-SCIE e RT-SCIE) exige que se faça uma verificação da resistência ao fogo das estruturas para escalões de tempo. A acção do fogo provoca uma diminuição da resistência dos materiais assim como um acréscimo do esforços exercidos através das acções indirectas. Em situação de incêndio, as estruturas devem atender a um tempo mínimo de resistência ao incêndio (normalizado) e aplicando as normas existentes fazer essa verificação.

O Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], apresenta três metodologias de verificação da resistência de estruturas de betão armado para situação de fogo: Métodos Tabelados, Método simplificados (Isotérmica dos 500°C e Método simplificado das Zonas) e Métodos avançados de cálculo.

No decorrer deste trabalho foram analisados os 2 primeiros métodos tendo sido desenvolvida uma aplicação numérica de verificação automática. São também desenvolvidos, integrados no programa, metodologias de cálculo para a aplicação de variados esforços: flexão simples, esforço axial simples, flexão composta e flexão desviada sendo este ultimo inovador na análise ao fogo.

É por fim realizada uma apresentação do modo de utilização deste programa a uma estrutura de um edifício. O desenvolvimento da ferramenta informática permite numa primeira abordagem à verificação dos elementos estruturais sujeitos a incêndio, impossível sem ela em tempo útil, devido a quantidade de cálculos a verificar.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência, betão, incêndio, métodos tabelados, métodos simplificados.

ABSTRACT

The fire codes in Portugal (RJ-SCIE and RT-SCIE) requires a verification of the fire resistance of structures and in particular the reinforced concrete elements. The fire action causes a decrease in strength of materials as well as increased efforts exerted through the indirect actions. In a fire, structures must ensure their functions during a certain time (for the ISO 834 fire), applying existing standards.

The Eurocode 2, Part 1-2, [1] presents three methods for calculation the fire resistance of concrete structures: the tabulated method, the simplified methods (500°C Isotherm and Zone method) and Advanced methods.

During this work the author analyzed the first two methods and developed a numerical application of automatic verification of fire resistance in concrete structural elements. It was also developed and integrated in a calculation program some methodologies for implementing various efforts: bending, axial simple, compound bending and diverted bending (the latter being innovative in the analysis to fire).

It is finally made a presentation of the computer application and a verification of a real scale structure with the program.

KEYWORDS: Resistance, concrete, fire, tabulated method, simplified method.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS	2

2. ESTADO DA ARTE – ACÇÃO DO FOGO, REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA E EUROCÓDIGO	3
2.1. ACÇÃO DO FOGO	3
2.1.1. INCÊNDIO	3
2.1.2. PROPAGAÇÃO DO CALOR	4
2.1.2.1. Condução	5
2.1.2.2. Convecção	5
2.1.2.3. Radiação	6
2.1.3. MODELAÇÃO DO INCÊNDIO	6
2.1.3.1. Curvas Nominais	7
2.1.3.2. Curvas Paramétricas	8
2.2. REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA	9
2.3. EUROCÓDIGO	11

3. MÉTODOS TABELADOS E MÉTODOS SIMPLIFICADOS ..	15
3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. ACÇÕES E CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS E MECÂNICAS DO BETÃO E DO AÇO A ALTAS TEMPERATURAS	16
3.2.1. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	16
3.2.2. BETÃO	18
3.2.2.1. Tensões de compressão e tracção e extensão limite e última	19
3.2.3. AÇO	21
3.3. MÉTODOS DOS VALORES TABELADOS	23

3.3.1. PILARES	25
3.3.1.1. Método A	26
3.3.1.2. Método B	28
3.3.1.1. Método C	29
3.3.2. PAREDES.....	30
3.3.2.1. Paredes sem funções de suporte de cargas.....	30
3.3.2.2. Paredes com funções estruturais.....	31
3.3.3. VIGAS	31
3.3.3.1. Vigas contínuas.....	32
3.3.3.2. Vigas simplesmente apoiadas	34
3.3.3.3. Vigas expostas nas quatro faces	35
3.3.4. LAJES	35
3.3.4.1. Lajes maciças simplesmente apoiadas.....	36
3.3.4.2. Lajes maciças contínuas	36
3.3.4.3. Lajes fungiformes	37
3.3.4.4. Lajes nervuradas.....	37
3.4. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO	38
3.4.1. Método da Isotérmica de 500°C.....	39
3.4.2. Método das Zonas	40
3.4.3. Procedimentos de cálculos	41
3.4.3.1. Procedimento de cálculo da capacidade resistente de uma secção de betão armado exposta ao esforço axial e ao momento flector	41
3.4.3.2. Procedimento de cálculo de métodos simplificados da capacidade resistente de uma secção de betão armado com flexão composta desviada.....	43
3.4.3.3. Extensão no aço	45
3.4.3.4. Posicionamento das armaduras.....	45
 4. ORGANIGRAMA E EXPLICAÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO – MÉTODOS TABELADOS E SIMPLIFICADOS	 47
4.1. INTRODUÇÃO	47
4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA.....	48
4.2.1. LINGUAGEM.....	48
4.2.2. ESTRUTURA GERAL E FUNCIONALIDADES	48
4.3. FUNCIONAMENTO	50

4.3.1. MENU PRINCIPAL	50
4.3.2. MÉTODOS TABELADOS	50
4.3.2.1. Lajes.....	51
4.3.2.2. Vigas	53
4.3.2.3. Pilares	54
4.3.2.4. Paredes.....	56
4.3.2.5. Cálculos Complementares	57
4.3.3. MÉTODOS SIMPLIFICADOS	59
4.3.3.1. Lajes e Vigas (M+ e M-).....	59
4.3.3.2. Pilares e Paredes Tracção/Compressão simples (N)	62
4.3.3.3. Pilares e Paredes flexão composta (N+Mx).....	63
4.3.3.4. Pilares flexão desviada (N+Mx+My)	65
4.3.3.5. Cálculo das secções reduzidas	67
4.3.3.6. Perfis de temperatura	68

5. ADAPTAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS TABELADOS, ZONAS E ISOTÉRMICA 500°C

5.1. MÉTODOS TABELADOS	71
5.1.1. PILARES MÉTODO C.....	72
5.1.2. LAJES NERVURADAS	74
5.2. MÉTODOS SIMPLIFICADOS	75
5.2.1. VIGAS MOMENTOS POSITIVOS.....	75
5.2.2. PILARES SUJEITOS A ESFORÇO AXIAL SIMPLE.....	78
5.2.3. PILARES SUJEITOS A FLEXÃO COMPOSTA.....	79
5.2.4. PILARES SUJEITOS A FLEXÃO DESVIADA	83

6. APLICAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS NA AVALIAÇÃO DE VIGAS, PILARES E LAJES DE UM PROJECTO

6.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	85
6.2. VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS DA ESTRUTURA	87
6.2.1. VERIFICAÇÃO DO RSCIE	87
6.2.2. CÁLCULOS	87

6.2.2.1. Vigas	87
6.2.2.2. Pilares	89
6.2.2.3. Lajes	90
6.3. CONCLUSÕES	91

7. CONCLUSÕES E IMPLICAÇÕES NA PRÁTICA DE PROJECTO

93

7.1. CONCLUSÕES GERAIS	93
7.2. TRABALHO FUTURO	94

Bibliografia

97

ANEXOS

99

A.1. TABELAS DO MÉTODO C	101
A.2. PERFIS DE TEMPERATURA DO EUROCÓDIGO 2, PARTE 1-2	109
A.3. PROGRAMAS DE CÁLCULO	117
A.4. CÁLCULO DA ESTRUTURA EM ESTUDO	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Curva de Incêndio Natural; a) fase de ignição, b) fase de propagação, c) fase de desenvolvimentos pleno, d) fase arrefecimento ou extinção, [2].	4
Fig.2.2 – a) Convecção; b) Radiação; c) Condução, [2].	5
Fig.2.3 – Curvas nominais de incêndio, [4].	7
Fig.2.4 – Representação da Curva natural e da Curva padrão nominal, [4].	8
Fig.2.5 – Esquematização dos modelos de cálculo.	13
Fig. 3.1 – Relação entre σ_{fi} e h (ou b) para o risco de “Spalling”, [4].	15
Fig. 3.2 – Variação de η_{fi} , função de $\xi = Q_{k,1}/G_k$, para diferentes valores de $\psi_{1,1}$.	18
Fig. 3.3 – Coeficientes $k_c(\theta)$ e $k_{cT}(\theta)$ do betão com inertes siliciosos e calcários e betões de alta resistência para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.3, [4].	20
Fig. 3.4 – Coeficientes $k_s(\theta)$ do aço de Classe N para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4, [4].	22
Fig. 3.5 – Coeficientes $f_{sp,\theta}/f_{yk}$ e $E_{s,\theta}/E_s$ do aço de Classe N para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4 [4].	22
Fig. 3.6 – Definição das variáveis geométricas usadas nos quadros seguintes; a) distância da face exterior do elemento ao eixo das armaduras; b) menor dimensão da secção transversal ou dimensão de referência da viga; h - altura da viga; c) recobrimento nominal da armadura [1].	23
Fig. 3.7 – Curvas de referencia para a temperatura critica dos aços para betão armado e de pré-esforço, θ_{cr} , correspondente ao coeficiente de redução, [1].	24
Fig. 3.8 – Envolvente dos momentos flectores resistentes em situação de incêndio.	33
Fig. 3.9 – Definição das variáveis geométricas h_1 , h_2 e h_s ($h_s = h_1 + h_2$) para lajes de betão com revestimento de pavimento.	36
Fig. 3.10 – Isotérmica de 500°C e secção reduzida. Exposição ao fogo em três lados: a) Zona em tracção exposta; b) Zona em compressão exposta; c) Exposição nos quatro lados, [4].	39
Fig. 3.11 – Definição da variável az e W – Redução da resistência e da secção para peças sujeitas a incêndio: a) Parede; b) Parede espessa; c) Pilar; d) Extremo da parede; e) Viga; f) Laje; g) “Parede equivalente”, divisão da parede exposta ao incêndio em ambas as faces em zonas para o cálculo de redução da resistência e az , [4].	40
Fig. 3.12 – Distribuição de tensões e extensões no estado limite último para uma secção rectangular de betão armado reduzida com armadura de tracção e compressão.	42
Fig. 3.13 – Descrição do Modelo de cálculo simplificado de Jiminiz Montoya, [11].	44
Fig. 3.14 – Cálculo da distância entre o centro das armaduras e a face sujeita a incêndio, a .	46

Fig. 4.1 – Organigrama representativo dos Métodos e sub-métodos de cálculo	49
Fig. 4.2 – Menu principal do Programa SiFiRe.	50
Fig. 4.3 – Exemplo de apresentação de resultados para os Métodos TabeladosM; a) OK; b) KO; c) Não aplicável.....	51
Fig. 4.4 – Exemplo da página de Lajes Maciças.....	51
Fig. 4.5 – Exemplo da página de Lajes Nervuradas.	52
Fig. 4.6 – Exemplo da página de Lajes Fugiformes.....	53
Fig. 4.7 – Exemplo da página para Vigas.	53
Fig. 4.8 – Exemplo da página para Pilares pelo Método A.	54
Fig. 4.9 – Exemplo da página para Pilares pelo Método B.	55
Fig. 4.10 – Exemplos de diferentes comprimentos efectivos (l_0) para elementos Isolados, [9].	55
Fig. 4.11 – Exemplo da página para Paredes Divisórias.	56
Fig. 4.12 – Exemplo da página para Paredes com função de suporte.	57
Fig. 4.13 – Exemplo do programa de Melhoramento de resultado.	57
Fig. 4.14 – Exemplo do programa de Verificação de Recobrimento segundo EN 1992-1-1, [9].	58
Fig. 4.15 – Exemplo de resultados para o caso de lajes e vigas	60
Fig. 4.16 – Exemplo da página de inputs para o caso de lajes e vigas.	60
Fig. 4.17 – Exemplo de armaduras para Vigas.....	61
Fig. 4.18 – Exemplo de armaduras para Lajes.	62
Fig. 4.19 – Exemplo de resultados para o caso de pilares e paredes a Tracção / Compressão simples.	62
Fig. 4.20 – Exemplo da página de inputs para o caso de pilares e paredes a Tracção / Compressão simples.	63
Fig. 4.21 – Exemplo de armaduras para Pilares com esforço axial.....	63
Fig. 4.22 – Exemplo de resultados para o caso de pilares e paredes em flexão composta.	64
Fig. 4.23 – Exemplo da página de inputs para o caso de pilares e paredes em flexão composta.	64
Fig. 4.24 – Exemplo de armaduras para Pilares em flexão composta.....	65
Fig. 4.25 – Exemplo de resultados para o caso de pilares em flexão desviada.	66
Fig. 4.26 – Exemplo da página de inputs para o caso de pilares e paredes em flexão composta.	66
Fig. 4.27 – Exemplo de armaduras para Pilares em flexão desviada.....	67
Fig. 4.28 – Exemplo da página de inputs para o Método das Zonas.....	67
Fig. 4.29 – Perfil de temperatura para lajes e paredes.	68
Fig. 4.30 – Superfície da secção transversal para a qual são apresentados os perfis de temperatura; 1) Superfície do perfil de temperatura; 2) Secção transversal total.	69
Fig. 4.31 – Exemplo de perfil de temperatura para Vigas e Pilares.....	69

Fig. 5.1 – Verificação do comprimento de esbelteza pelo programa.....	72
Fig. 5.2 – Exemplo de interpolação simples para a obtenção de n valores para cada linha da tabela.....	73
Fig. 5.3 – Parte do programa que faz a interpolação final e verificação dos valores mínimos.....	73
Fig. 5.4 – Exemplo do programa principal de lajes nervuradas.....	74
Fig. 5.5 – Gráfico de momentos resistentes em função da temperatura para duas metodologias de cálculo.....	77
Fig. 5.6 – Cálculo do esforço axial resistente pelo programa.....	79
Fig. 5.7 – Diagrama de extensões possíveis em relação ao eixo neutro para pilar modelo.....	80
Fig. 5.8 – Programa de flexão composta em pilares.....	82
Fig. 5.9 - Gráfico de momentos resistentes à temperatura ambiente segundo duas metodologias	83
 Fig. 6.1 – Planta estrutural de um piso do edifício	86
Fig. 6.2 – Viga em estudo	88
Fig. 6.3 – Pilares em estudo	89
Fig. 6.4 – Laje em estudo	91
 Fig.A2.1 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 150 \times 80 - R 30$	109
Fig.A2.2 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160$	110
Fig.A2.3 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160 - R90$	110
Fig.A2.4 – Isotérmica de 500°C para uma viga $h \times b = 300 \times 160$	110
Fig.A2.5 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300$	111
Fig.A2.6 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300 - R 120$	111
Fig.A2.7 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$	112
Fig.A2.8 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$	112
Fig.A2.9 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar, $h \times b = 300 \times 300$	113
Fig.A2.10 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar, $h \times b = 300 \times 300$	113
Fig.A2.11 – Isotérmica de 500°C para um pilar, $h \times b = 300 \times 300$	114
Fig.A2.12 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar circular, diâmetro 300	114
Fig.A2.13 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar circular, diâmetro 300	115
Fig.A2.14 – Isotérmica de 500°C para um pilar circular, diâmetro 300.....	115

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 2.1 – Categorias de risco para Utilização tipo “Habitacional”[6].	9
Quadro 2.2 – Factores de classificação do risco em função da utilização tipo . I) Habitacional; II) Estacionamento; III) Administrativo; IV) Escolares; V) Hospitalares e lares de idosos; VI) Espectáculos; VII) Desportivos; VIII) Hoteleiros; IX) Comerciais; X) Museus; XI) Bibliotecas; XII) Industriais.	10
Quadro 2.3 – Resistências Mínimas para cada Utilização-tipo em função da categoria de risco .	10
Quadro 3.1 – Coeficientes ψ_t , [7].	17
Quadro 3.2 – Efeitos da temperatura nos constituintes do betão, [8].	19
Quadro 3.3 – Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de betões correntes siliciosos e calcários sujeitos a elevadas temperaturas.	20
Quadro 3.4 – Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de aços correntes de Classe N sujeitos a elevadas temperaturas.	21
Quadro 3.5 – Método A - Dimensões mínimas dos pilares e distâncias mínimas do eixo dos varões à face exterior para pilares de betão armado ou pré-esforçado de secção rectangular ou circular, [1].	26
Quadro 3.6 – Método B - Dimensões mínimas dos pilares e distâncias mínimas do eixo dos varões à face exterior para pilares de betão armado de secção rectangular ou circular, [1].	29
Quadro 3.7 – Método baseado na estimativa da curvatura – Parâmetros de caracterização de cada quadro apresentado no Anexo C do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].	29
Quadro 3.8 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,1$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,025b$ com $e \geq 10\text{mm}$) [1].	30
Quadro 3.9 – Dimensões mínimas de paredes sem funções de suporte de cargas [1].	31
Quadro 3.10 – Dimensões mínimas das paredes resistentes de betão e distância ao eixo, a , [1].	31
Quadro 3.11 – Dimensões mínimas da largura da viga e da distância ao eixo dos varões para vigas contínuas de betão armado ou pré-esforçado, [1].	34
Quadro 3.12 – Larguras mínimas da viga e da alma para vigas em “I” de betão armado ou pré-esforçado [1].	34
Quadro 3.13 – Dimensões mínimas da alma de vigas simplesmente apoiadas e da distância ao eixo dos varões para vigas de betão armado ou pré-esforçado, [1].	35
Quadro 3.14 – Dimensões mínimas da espessura da laje e da distância ao eixo dos varões para lajes de betão armado ou pré-esforçado, [1].	36
Quadro 3.15 – Dimensões mínimas da espessura de lajes fungiformes e da distância da face ao eixo dos varões para lajes de betão armado ou pré-esforçado, [1].	37

Quadro 3.16 – Dimensões mínimas e da distância da face ao eixo do varão de lajes nervuradas armadas em duas direcções: a) simplesmente apoiadas; b) com pelo menos um lado encastrado, [1].	38
Quadro 3.17 – Largura mínima da secção em função da resistência ao fogo e da densidade de carga de incêndio, para o incêndio padrão e curvas paramétricas, respectivamente.	39
Quadro 3.18 – Valores do coeficiente β para determinação da excentricidade fictícia	45
Quadro 4.1 – Incrementos a Classificação estrutural recomendada[9].	59
Quadro 5.1 – Parte do Quadro 3.8. Exemplo de valores a vermelho	72
Quadro 6.1 – Áreas Brutas de projecto por piso	85
Quadro 6.2 – Temperaturas e coeficientes redutores para armadura inferior.	87
Quadro 6.3 – Temperaturas medias e coeficientes redutores das secções de betão.	88
Quadro 6.4 – Resultados obtidos para viga em momentos positivos.	88
Quadro 6.5 – Resultados do Método Tabelado.	89
Quadro 6.6 – Características do pilares.	89
Quadro 6.7 – Temperatura das armaduras por pilar.	90
Quadro 6.8 – Resultados para caso de pilares.	90
Quadro 6.9 – Resultados obtidos para Lajes em momentos positivos.	91
Quadro A1.1 – C.2 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,1$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,25b$ com $e \leq 100\text{mm}$), [7].	101
Quadro A1.2 – C.3 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,1$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,5b$ com $e \leq 200\text{mm}$), [7].	102
Quadro A1.3 – C.4 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,5$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,025b$ com $e \geq 10\text{mm}$), [7].	103
Quadro A1.4 – C.5 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,5$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,25b$ com $e \leq 100\text{mm}$), [7].	104

Quadro A1.5 – C.6 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,5$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,5b$ com $e \leq 200\text{mm}$), [7].	105
Quadro A1.6 – C.7 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=1$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,025b$ com $e \geq 10\text{mm}$), [7].	106
Quadro A1.7 – C.8 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=1$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,25b$ com $e \leq 100\text{mm}$), [7].	107
Quadro A1.8 – C.9 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=1$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,5b$ com $e \leq 200\text{mm}$), [7].	108

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	Distância do eixo das armaduras longitudinais a face [m]
a_{500}	Espessura degradada de betão obtida pelo Método das Zonas [m]
a_z	Espessura degradada de betão obtida pelo Método da isotérmica de 500°C [m]
A_c	Área de secção de betão
A_d	Valor de cálculo da acção accidental
A_s	Área de aço. Área de armadura de tracção. Área total de armadura
A'_s	Área de aço. Área de armadura em compressão
$A_{s,req}$	Área de aço requerida para o estado limite ultimo de acordo com o Eurocódigo 2, parte 1-1, [7]
$A_{s,prov}$	Área de aço utilizada
b	Menor dimensão da secção do elemento. Largura original da peça [m]
b_{fi}	Largura efectiva da secção reduzida [m]
b_{min}	Menor dimensão do pilar [m]
d	Altura efectiva. Espessura da parede [m]
d_{fi}	Altura efectiva da secção reduzida [m]
e	Excentricidade [m]
e'	Excentricidade fictícia [m]
E	Modulo de elasticidade [GPa]
E_d	Efeito das acções apartir da combinação fundamental à temperatura ambiente
$E_{d,fi}$	Efeito das acções apartir da combinação fundamental em incêndio
$E_{fi,d,t}$	Valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio no instante t
E_s	Modulo de elasticidade do aço [GPa]
$E_{s,\theta}$	Modulo de elasticidade do aço para determinada temperatura [GPa]
$f_{ck}, f_{ck,20^\circ C}$	Valor característico da resistência da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade [MPa]
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão [MPa]
$f_{c,\theta}, f_{ck,\theta}$	Tensão máxima de compressão do betão em função da temperatura [MPa]
$f_{cd,\theta}$	Tensão de cálculo máxima de compressão do betão em função da temperatura [MPa]

f_{ck}	Valor característico da resistência da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade [MPa]
f_{sp}	Tensão limite de proporcionalidade do aço [MPa]
$f_{sp,\theta}$	Tensão limite de proporcionalidade do aço em função da temperatura [MPa]
f_{sd}	Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço à temperatura ambiente [MPa]
$f_{sd,\theta}$	Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço em situação de incêndio [MPa]
$f_{sd,fi, \theta m}$	Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço em situação de incêndio à temperatura media do nível de armadura [MPa]
f_{sy}	Tensão de cedência à tracção do aço à temperatura ambiente [MPa]
$f_{sy,\theta}$	Tensão de cedência à tracção do aço em situação de incêndio [MPa]
f_{yk}	Tensão característica de cedência do aço à temperatura ambiente [MPa]
F_s	Força de tracção/compressão aplicada para nível de armadura inferior [KN]
F'_s	Força de tracção/compressão aplicada para nível de armadura superior [KN]
G_k	Valor característico das acções permanentes [KN]
h	Altura da secção [m]
h_c	Densidade de fluxo de calor no interior do corpo [W/m ²]
$h_{net,c}$	Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido a convecção [W/m ²]
$h_{net,d}$	Fluxo de calor [W/m ²]
$h_{net,r}$	Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido a radiação [W/m ²]
h_s	Altura da laje acrescida da espessura equivalente, em betão, dos revestimentos de piso e de tecto [m]
i	Raio de giração
k	Coeficiente de transmissão térmica. Condutibilidade térmica [W/m°C]
k_1	Factor que depende da classe de resistência do betão
k_2	Factor que depende da carga axial e esbelteza
$k_{c,m}$	Factor de redução das características médias do betão
$k_c(\theta_i)$	Factor de redução das características médias do betão em cada zona
$k_c(\theta_i)$	Factor de redução das características médias do betão no ponto médio M
$k_c(\theta)$	Coeficiente de redução da tensão de compressão do betão
$k_{cT}(\theta)$	Coeficiente de redução da tensão de Tracção do betão
$k_{(\theta)}$	Factor de redução da tensão dependente da temperatura do material

l	Comprimento dos elementos [m]
l_0 , l_{eff}	Comprimento efectivo do pilar à temperatura ambiente [m]
$l_{0,fi}$	Comprimento efectivo do pilar sujeito a incêndio [m]
l_{inf}	Largura de influencia [m]
l_x , l_y	Largura da laje [m]
$M_{0Ed,fi}$ e $N_{0Ed,fi}$	Valores de cálculo do momento de primeira ordem e carga axial em situação de incêndio [KN.m , KN]
M_{Ed} e N_{Ed}	Valores de cálculo do momento e carga axial à temperatura ambiente [KN.m , KN]
$M_{Rd,fi}$ e $N_{Rd,fi}$	Momento flector resistente e esforço axial resistente em situação de incêndio [KN.m , KN]
M_{Rd} e N_{Rd}	Momento flector resistente e esforço axial resistente à temperatura ambiente [KN.m , KN]
n	Nível de carregamento. Número de varões da armadura de cada nível
N_{sd}	Valor de cálculo do esforço axial actuante à temperatura ambiente [KN]
$N_{sd,fi}$	Valor de cálculo do esforço axial actuante em situação de incêndio [KN]
p_{sd}	Valor da carga distribuída
$Q_{k,l}$	Valor característico da acção variável principal [KN]
$Q_{k,i}$	Valor característico das restantes acções variáveis [KN]
$R_{fi,d,t}$	Valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante t
$V_{Rd,max}$	Valor de cálculo do esforço transversal máximo [KN]
V_{Ed}	Valor de cálculo do esforço transversal aplicado à temperatura ambiente [KN]
t	Instante de tempo
x	Coordenada de posição. Profundidade do eixo neutro [m]
$X_{d,fi}$	Valor de cálculo das propriedades térmicas ou mecânicas
$X_{k(\theta)}$	Valor característico da propriedade em situação de incêndio, função da temperatura θ
X_k	Valor característico da propriedade à temperatura ambiente
y	Coordenada de posição [m]
W	Largura da parede equivalente. Metade da largura da secção do pilar
z	Braço do momento relativo à zona em compressão de betão e tracção das armaduras [m]
z'	Braço do momento relativo das armaduras [m]
α	Coefficiente de dilatação térmica

α_c	Coeficiente de transmissão de calor por convecção [W/m ² K]
α_{cc}	Coeficiente de resistência à compressão do betão tendo em conta os efeitos a longo prazo
β	Coeficiente dependente do esforço esforço normal reduzido, ν
ε	Extensão [m]
ε_c	Extensão do betão [m]
ε_{cu}	Extensão limite última do betão [m]
ε_f	Emissividade do compartimento de incêndio
ε_m	Emissividade da superfície do elemento
ε_s	Extensão do aço [m]
ϕ, ϕ_{arm}	Diâmetro das armaduras [mm]
ϕ_{estrib}	Diâmetro dos estribos [mm]
γ_{GA}	Coeficiente de segurança parcial para as acções permanentes em situação de incêndio
γ_s	Factor parcial de segurança do aço
γ_c	Factor parcial de segurança do betão
$\gamma_{M_{fi}}$	Factor parcial de segurança para a propriedade em causa em situação de incêndio
λ	Esbelteza à temperatura ambiente
λ_{fi}	Esbelteza em situação de incêndio
μ_{fi}	Factor redução em função do nível de carregamento, função da combinação de acções, resistência à compressão e resistência à flexão com efeito de segunda ordem.
η, ν	Nível de carregamento
η_{fi}	Nível de carregamento para situação e incêndio
$\psi_i, \psi_{1,i}, \psi_{2,i}, \psi_{fi}$	Coeficiente de combinação de acordo com o Eurocódigo
θ	Temperatura [°C]
θ_g, θ_r	Temperatura na vizinhança do elemento [°C]
θ_m	Temperatura na superfície do elemento [°C]
θ_{cr}	Temperatura critica das armaduras [°C]
σ	Tensão de compressão. Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
σ_{fi}	Tensão de compressão em situação de incêndio [MPa]
σ_{fi}	Tensão de compressão em situação de incêndio [MPa]

σ_s	Tensão de cedência do aço [<i>MPa</i>]
$\sigma_{s,fi}$	Tensão de cedência do aço em situação de incêndio [<i>MPa</i>]
$\sigma_{s,e}$	Tensão de cedência do aço para uma determinada extensão [<i>MPa</i>]
ω	Relação mecânica de armadura à temperatura ambiente
Φ	Factor de configuração
δ	Redistribuição dos momentos feita no dimensionamento à temperatura ambiente
EN	“Norme Européenne”
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
RT-SCIE	Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios
RJ-SCIE	Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios
RSAEEP	Regulamento de Segurança e Acções de Estruturas de Edifícios e Pontes
RSCIE	Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios
SCIE	Segurança Contra Incêndios em Edifícios
SimFirb	“Simplified Fire Resistance beam”
SimFirc	“Simplified Fire Resistance column”

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

Vivendo nós numa época de grande inspiração arquitectónica, promovendo o desenvolvimento tecnológico, surge igualmente a necessidade de novas ferramentas de cálculo que nos permitam calcular estruturas de grande complexidade e escala. Sendo os requisitos destas estruturas cada vez mais exigentes do ponto de vista de segurança estrutural, surge a importância do estudo das acções a que estão sujeitas, em particular a acção do incêndio.

Na maior parte dos casos as acções consideradas no dimensionamento das estruturas são as permanentes e as variáveis. No entanto, face ao elevado nível de exigência destas estruturas torna-se também necessário o dimensionamento tendo em conta as acções acidentais.

Sendo o fogo uma das acções acidentais mais comuns, e uma das mais responsáveis pelos danos nas estruturas bem como pelos prejuízos decorrentes, o estudo desta acção para o dimensionamento das estruturas ganha grande importância.

A acção do fogo é, de uma forma simplificada, numa variação de temperatura dos elementos estruturais que constituem o edifício. Deste facto resulta a ocorrência de dilatações térmicas (podendo provocar esforços consideráveis em estruturas hiperestáticas) e a alteração das propriedades dos materiais constituintes desses elementos. As alterações das propriedades dos materiais ocorrem a nível físico e químico, provocando uma degradação das mesmas em função da temperatura atingida, que resultam numa diminuição da capacidade resistente dos elementos, podendo originar a ruína da estrutura.

A actual regulamentação em vigor permite a análise de uma estrutura sujeita a incêndio, elemento a elemento, não tendo em conta a interacção entre eles. Esta dissertação tem como principal objectivo, através da regulamentação existente, a avaliação da estrutura de um edifício sujeita ao incêndio aplicando os Métodos Tabelados e Simplificados do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

Durante a realização da dissertação foram também desenvolvidos modelos numéricos nos quais analisamos elementos estruturais através dos Métodos Tabelados e Simplificados (Zonas e Isotérmica de 500°C). Os vários modelos numéricos, sejam para vigas, lajes, paredes ou pilares foram inseridos no desenvolvimento do programa de cálculo SiFiRe. Este programa foi usado para a aplicação de um caso real onde se retiraram conclusões sobre a aplicação distinta das duas metodologias.

Algumas das conclusões permitiram avaliar a importância de cada método e fazer uma apreciação do comportamento dos elementos estruturais individuais sujeitos a incêndio.

1.2. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS

A presente dissertação está organizada em 7 capítulos, o primeiro dos quais constituído pela presente introdução, onde se faz o enquadramento do trabalho desenvolvido e se traçam os principais objectivos.

No capítulo 2 procura-se fazer a caracterização de projecto da acção do fogo e uma apresentação da regulamentação de segurança contra incêndio e dos Eurocódigos.

No capítulo 3 é analisada a abordagem do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], para o efeito da temperatura nos materiais constituintes das estruturas de betão, e uma apresentação dos métodos de análise das estruturas do mesmo regulamento.

No capítulo 4 é feita uma apresentação do programa desenvolvido durante a dissertação e é seguido do capítulo 5 onde são explicados alguns dos algoritmos desenvolvidos para o programa.

O capítulo 6 é dedicado a um caso prático de projecto, onde é analisada uma estrutura pelos vários métodos do programa.

No capítulo 7, apresenta-se uma síntese do trabalho realizado, salientando as principais conclusões retiradas ao longo do trabalho e definem-se tarefas para desenvolvimentos futuros.

Por fim, em anexo, são apresentadas as tabelas para o Método C dos valores tabelados referidas no capítulo 3 (Anexo A1), os perfis de temperatura necessários para a aplicação do programa (Anexo A2), os programas integrais de vigas em programação (Anexo A3) e a apresentação de resultados da análise de projecto (Anexo A4).

2

ESTADO DA ARTE – ACÇÃO DO FOGO, REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA E EUROCÓDIGO

2.1. ACÇÃO DO FOGO

No dimensionamento de estruturas de Betão armado, a acção do fogo é uma exigência fundamental, sendo o seu estudo de grande importância. Na última década, devido à ocorrência do colapso de edifícios de grande importância (Ex.: World Trade Center, NY, e a Torre de Windsor, Madrid), ao crescimento do poder económico e à valorização da vida humana, o grau de exigência e a importância do estudo da acção do incêndio têm aumentado.

O incêndio, sendo uma acção accidental, não há forma de prever a sua ocorrência. Assim, as estruturas terão que ser calculadas de maneira a permitir fazer a evacuação dos edifícios em tempo útil e ainda permitir o combate do incêndio por parte dos bombeiros; E por fim, se possível, salvar a estrutura.

O fogo resulta de um processo termoquímico exotérmico de oxidação. Para que esta reacção ocorra, é necessário que estejam reunidos os seguintes elementos:

- Combustível – Componente inflamável, sendo normalmente um elemento orgânico;
- Comburente – Elemento capaz de oxidar o combustível, como o oxigénio;
- Fonte de ignição – Fonte de calor capaz de fornecer energia suficiente para iniciar a reacção;
- Reacção em cadeia – Permite a manutenção do fogo.

Depois de iniciada a reacção, para que o fogo se desenvolva apenas será necessário a existência de componentes combustíveis para o alimentar.

2.1.1. INCÊNDIO

O processo de desenvolvimento de um incêndio pode ser descrito em 4 fases: ignição, propagação, desenvolvimento pleno e arrefecimento ou extinção (Figura 2.1). Estas 4 fases são descritas na curva natural de incêndio.

A fase de ignição ocorre quando existir uma fonte de energia capaz de activar o material combustível. Esta fonte de energia normalmente é causada de forma accidental, como por exemplo curto-circuitos, pontas de cigarros, faíscas de uma operação de soldadura, ou máquinas que não estejam a operar correctamente. Esta fase é caracterizada por ser de evolução lenta e a baixas temperaturas.

A seguir à ignição e com a existência de oxigénio e em determinadas condições irá ocorrer uma inflamação generalizada que se denomina de *flashover*. Esta inflamação ocorre normalmente para temperaturas da ordem dos 450°C aos 600°C. Após o *flashover* ocorre um aumento rápido das temperaturas e denomina-se por fase de propagação.

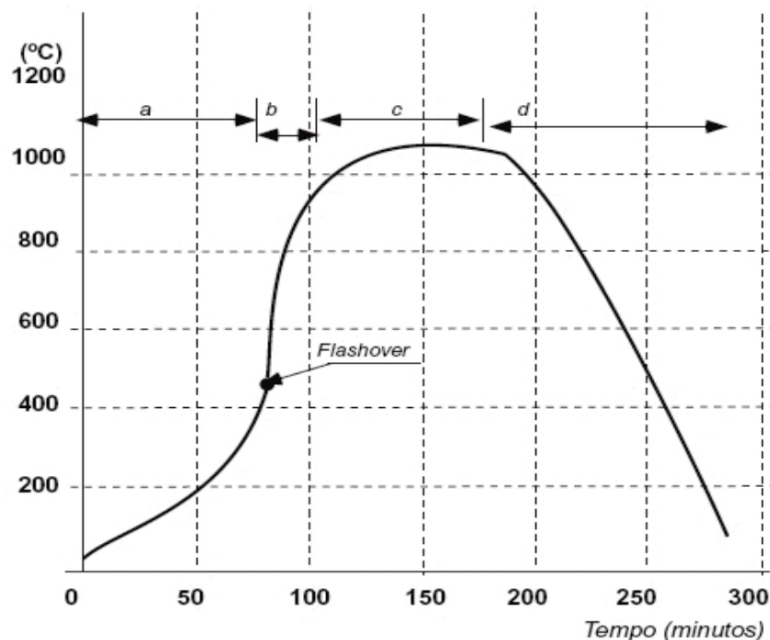


Fig. 2.1 – Curva de Incêndio Natural; **a)** fase de ignição; **b)** fase de propagação; **c)** fase de desenvolvimentos pleno; **d)** fase arrefecimento ou extinção, [2].

Quando as temperaturas começam a estabilizar em temperaturas elevadas e é atingido o desenvolvimento pleno do incêndio. É nesta fase que se dá a combustão da maior parte dos materiais combustíveis, terminando na fase de arrefecimento ou extinção quando estes materiais começam a ser insuficientes ou existe intervenção de agentes externos que provocam uma diminuição progressiva da temperatura.

Quando durante o incêndio a ventilação é suficiente e a combustão depende apenas das características e quantidade do combustível, diz-se que o incêndio é controlado pela carga de incêndio. Quando por outro lado a ventilação é insuficiente para a carga de incêndio disponível diz-se que o incêndio é controlado pela ventilação.

2.1.2. PROPAGAÇÃO DO CALOR

O estudo da propagação do calor é bastante importante no estudo de um incêndio. A propagação é definida como sendo a transmissão de energia de um meio para outro meio sólido, líquido ou gasoso, sendo que este fluxo, quantidade de calor transmitida por unidade de área e por unidade de tempo, ocorre das temperaturas mais elevadas para as mais baixas.

Normalmente são considerados três processos de propagação do fogo, que são a condução, a convecção e a radiação, que podem coexistir (Figura 2.2).

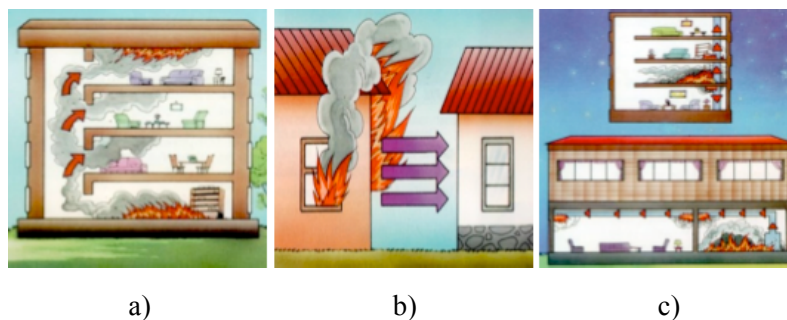


Fig. 2.2 – a) Convecção; b) Radiação; c) Condução, [2].

Segundo as disposições regulamentares , Eurocódigo 1, parte 1-2, [3], o fluxo de calor poderá ser calculado através da expressão:

$$h_{net,d} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad [W/m^2] \quad (2.1)$$

Em que:

$h_{net,d}$ - Fluxo de calor $[W/m^2]$

$h_{net,c}$ - Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à convecção $[W/m^2]$

$h_{net,r}$ - Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à radiação $[W/m^2]$

2.1.2.1. Condução

A condução é o processo de propagação de calor no interior dos materiais por contacto ou por aquecimento, das partes mais quentes para as partes mais frias, sem que haja transporte de material. Esta transferência de calor é mais notória quanto melhor condutor for o material (ex. metais). Este processo é regido pela Lei de Fourier, que estabelece que o fluxo de calor que atravessa uma dada superfície é proporcional ao produto da área atravessada pelo gradiente de temperaturas existente, ou seja:

$$h_c = -k \cdot \frac{d\theta(x)}{dx} \quad [W/m^2] \quad (2.2)$$

Em que:

h_c - Densidade de fluxo de calor no interior do corpo $[W/m^2]$
 k - Coeficiente de condutibilidade térmica $[W/m^\circ C]$
 θ - Temperatura no interior do elemento $[^\circ C]$
 x - Coordenada de posição $[m]$

2.1.2.2. Convecção

A transmissão de calor por convecção caracteriza-se pela transmissão de calor através do movimento de um fluido (líquido ou gasoso), quer no seu interior quer devido ao contacto com partes sólidas devido ao gradiente térmico.

A convecção pode ainda ser natural ou forçada, dependendo da acção que lhe dá origem. Assim, teremos convecção natural, quando o movimento é originado pela acção térmica do próprio fluido e convecção forçada quando o movimento do fluido se deve a uma acção mecânica externa (Ex.: ventilador, bomba, etc.).

Estes dois tipos de convecção podem ocorrer simultaneamente na propagação de um incêndio e no interior de um compartimento. A lei matemática que traduz a convecção foi descoberta do Newton que relaciona a quantidade de calor transmitida entre a superfície e o fluido que o rodeia.

$$h_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (2.3)$$

Em que:

$h_{net,c}$	- Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à convecção	[W/m ²]
α_c	- Coeficiente de transmissão de calor por convecção	[W/m ² K]
θ_g	- Temperatura de gases na vizinhança do elemento	[°C]
θ_m	- Temperatura na superfície do elemento	[°C]

2.1.2.3. Radiação

A radiação, ao contrário das outras formas de transmissão de calor, não precisa de contacto directo entre materiais para que se crie um fluxo de energia. O calor é transmitido por ondas electromagnéticas, visível em ultravioleta, sendo que as ondas ao atingir a superfície de um outro meio, uma parte desse calor é reflectida, outra transmitida e outra absorvida, degradando-se em calor.

Para se descrever a radiação é usada a fórmula de Stefan-Boltzmann que é usada para saber o valor de radiação emitida pelo elemento.

$$h_{net,r} = \Phi \cdot \epsilon_f \cdot \epsilon_m \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2.4)$$

Em que:

$h_{net,r}$	- Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à radiação	[W/m ²]
Φ	- Factor de configuração e que segundo o Eurocódigo 2, parte 1-2 [1], deve ser igual a 1,0	
ϵ_f	- Emissividade do compartimento de incêndio que segundo EC1, parte 1-2, deve ser igual a 1,0	
ϵ_m	- Emissividade da superfície do elemento	
σ	- Constante de Stefan-Boltzmann	[=5,67.10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴]
θ_r	- Temperatura na radiação na vizinhança do elemento	[°C]
θ_m	- Temperatura na superfície do elemento	[°C]

2.1.3. MODELAÇÃO DO INCÊNDIO

A modelação do incêndio consiste em obter uma curva representativa do comportamento de um incêndio ao longo do tempo. Estas curvas são de grande importância para o desenvolvimentos dos métodos usados durante a dissertação, pois vão definir a evolução das temperaturas dos elementos estruturais em estudo.

Sendo bastante difícil obter a curva de incêndio natural (Figura 2.1), devido a estas serem únicas em cada incêndio e dependentes de vários factores, o Eurocódigo 1, parte 1-2, [3], em vigor dá-nos dois tipos de curvas :

- Curvas Nominais;
- Curvas Paramétricas.

2.1.3.1. Curvas Nominais

As Curvas Nominais são curvas que são independentes do tamanho do edifício e das características do compartimento. Estas curvas normalizadas foram determinadas resolvendo-se a expressão do balanço de energia do compartimento. O Eurocódigo 1, parte 1-2, [3], define 3 curvas para 3 diferentes casos :

- Curva de Incêndio padrão ISO 834;

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (2.5)$$

- Curva de Incêndio para elementos exteriores;

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) \quad (2.6)$$

- Curva de Incêndio de Hidrocarbonetos.

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad (2.7)$$

Em que:

θ_g - Temperatura de incêndio num compartimento com incêndio
 t - Tempo

[°C]
 [min]]

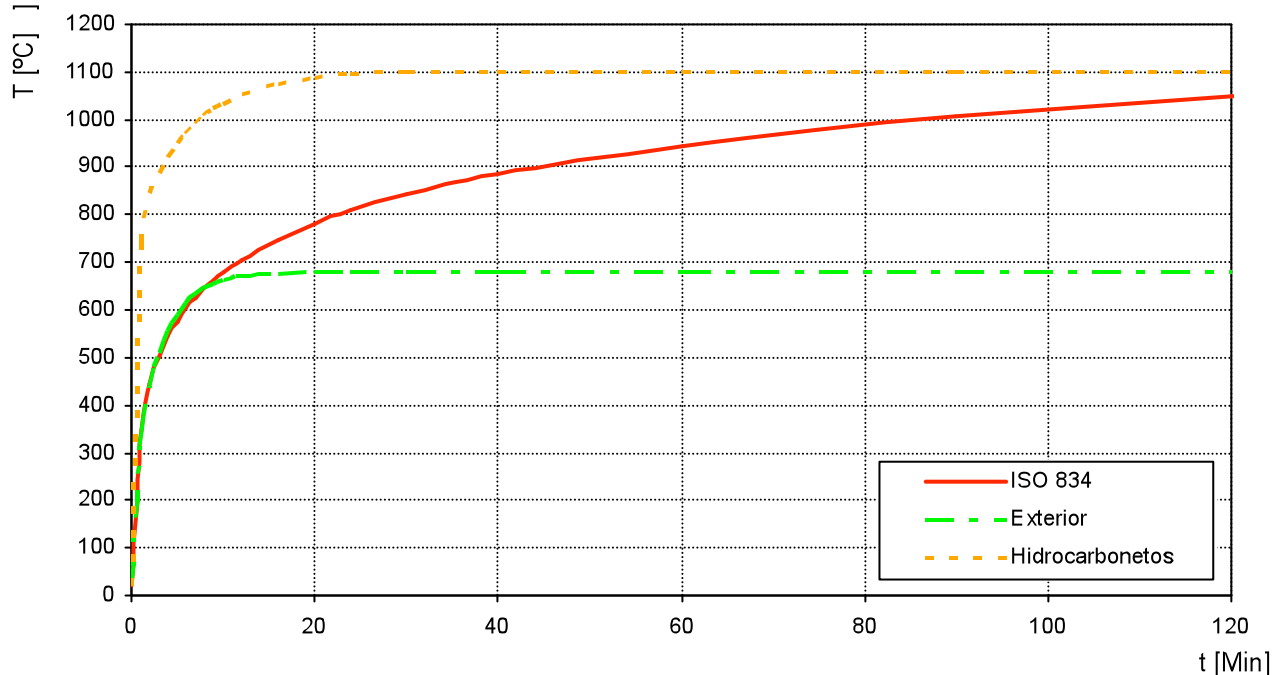


Fig. 2.3 - Curvas nominais de incêndio, [4].

Como se pode ver na Figura 2.3 as 3 curvas são distintas umas das outras e da curva de incêndio natural (Figura 2.1), não apresentando fases de ignição e extinção ou arrefecimento.

A curva de incêndio de elementos exteriores tem a vantagem de não colocar a estrutura em contacto directo com o incêndio, o que faz com que seja menos severa no valor máximo de temperatura atingida.

A curva dos Hidrocarbonetos tem um crescimento da temperatura muito mais acelerado, atingindo o valor máximo de temperatura muito mais rapidamente que as outras duas.

A curva ISO 834 é a que é mais vezes usada para cálculo de estruturas edificadas, representando um incêndio num edifício onde o tipo de carga de incêndio são a madeira, os tecidos, o papel, entre outros. Esta curva também é caracterizada por ter um crescimento infinito.

Comparando as curvas nominais com a curva de incêndio natural chega-se à conclusão que por estas não terem fase de arrefecimento e extinção, Figura 2.4, poderão provocar grandes erros no estudo de estruturas, visto que nesta fase existem retracções e perdas de ductilidade que podem provocar roturas. Não obstante este risco, as curvas são de grande importância para definir o conceito de *fogo regulamentar*, essencial no estudo da acção do fogo.

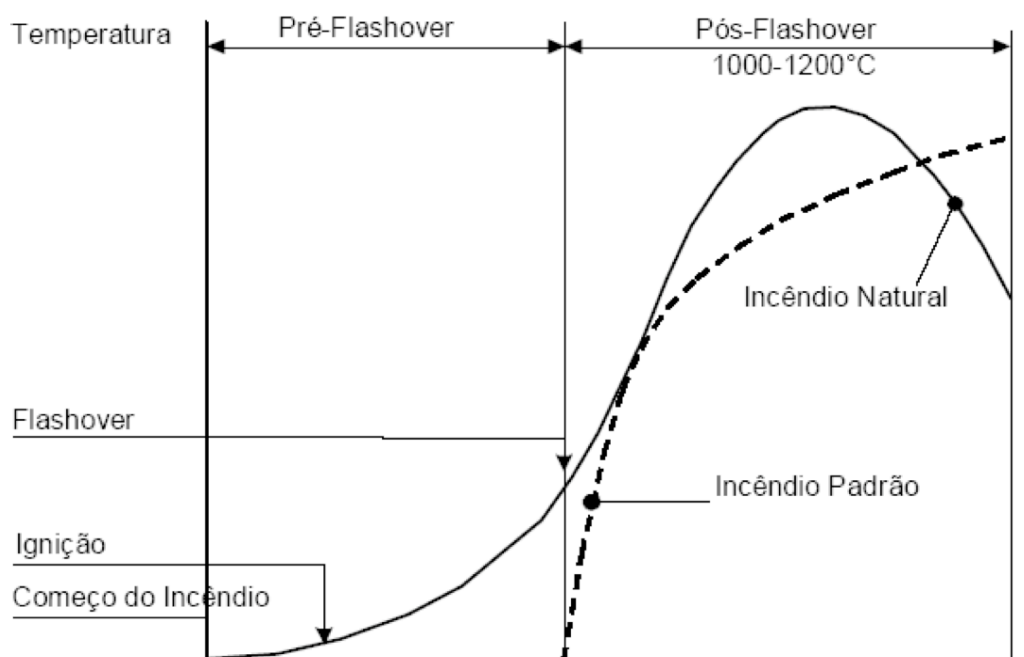


Fig. 2.4 – Representação da Curva natural e da Curva padrão nominal, [4].

2.1.3.2. Curvas Paramétricas

As curvas de incêndio Paramétricas são curvas mais realistas que as nominais, pois entram em conta com os factores: densidade de carga de incêndio, condições de arejamento, e dos materiais constituintes das paredes envolventes do compartimento além de terem fase de arrefecimento e extinção.

As curvas paramédicas são também descritas no Eurocódigo 1, parte 1-2 , Anexo A [3], e apresentam variações em função dos factores utilizados. Quando se aumenta o factor de ventilação, o incêndio irá

tornar-se mais curto mas com temperaturas mais elevadas enquanto que se aumentar a carga de incêndio irá aumentar-se a duração do mesmo.

2.2. REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA

Um importante incremento na regulamentação contra incêndios em Portugal foi dado após o grande Incêndio dos Armazéns do Chiado na Baixa de Lisboa, em 1988. Recentemente, devido a necessidade de actualizar os regulamentos dispersos para as várias utilizações dos edifícios, foi aprovado o Decreto de Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro, juntamente com a Portaria nº 1532/2008, de 29 de Dezembro, correspondentes respectivamente ao regime jurídico de segurança contra incêndio em edifícios (RJ-SCIE), [5], e regulamento técnico (RT-SCIE), [6].

O Regulamento de segurança contra incêndio em edifícios (RSCIE) vem desta forma criar um conjunto de regras de forma a preservar a vida humana assente nas seguintes condições:

- Se possa evacuar e salvar os seus ocupantes de forma segura;
- Permitir uma intervenção segura das equipas de Socorro;
- Reduzir e evitar as ocorrências de fogo;
- Limitar a propagação do fogo e fumo no edifício;
- Assegurar a estabilidade do edifício por um período de tempo predeterminado.

O novo regime jurídico de SCIE veio desta forma classificar os edifícios em 12 tipos de utilização e 4 categorias de risco [5]. A caracterização das categorias de risco, é feita em função dos 7 factores seguintes:

- Altura do Edifício;
- Número de pisos a baixo do plano de referência;
- Área Bruta;
- Espaço coberto ou ao ar livre;
- Efectivo (número máximo de utilizadores);
- Efectivo em locais de risco (D* ou E**);
- Locais de risco com saída independente e directas no plano de referência;
- Carga de incêndio.

* - D são locais de presença de pessoas de mobilidade ou percepção reduzidas

** - E são locais de dormida, em estabelecimento, que não caibam na definição de local de risco D

A partir de alguns destes sete factores, cada tipo de edifício é dividido nas 4 categorias de risco, sendo a primeira a menos gravosa e consequentemente a quarta a mais gravosa. No Quadro 2.1 é dado, para o exemplo de utilização tipo habitação, a forma como os factores permitem a classificação das categorias de risco e no Quadro 2.2 é apresentada a relação entre utilização tipo e os factores de avaliação para todas as utilizações tipo.

Quadro 2.1 – Categorias de risco para Utilização tipo “Habitacional”, [6].

Categoria	Critérios referentes a Utilização tipo 1	
	Altura da UT1	Número de Pisos da UT1 abaixo do plano de referência
1 ^a	≤9m	≤1
2 ^a	≤28m	≤3
3 ^a	≤50m	≤5
4 ^a	>50m	>5

Quadro 2.2 - Factores de classificação do risco em função da utilização tipo . I) Habitacional; II) Estacionamento; III) Administrativo; IV) Escolares; V) Hospitalares e lares de idosos; VI) Espectáculos; VII) Desportivos; VIII) Hoteleiros; IX) Comerciais; X) Museus; XI) Bibliotecas; XII) Industriais.

Utilização tipo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Altura	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Área bruta		X										
Saída directa ao exterior D, E				X	X		X					
Cobertura ao ar livre		X				X			X			X
Efectivo total			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Efectivos locais D, E				X	X		X					
Nº pisos abaixo do plano de Ref.	X	X				X		X	X		X	X
Densidade de carga de incêndio modificada											X	X

A resistência ao fogo traduz-se numa medida da capacidade de um elemento estrutural resistir a um incêndio. É normalmente quantificada como o tempo para o qual o elemento construtivo pode garantir determinado critério quando submetido a um incêndio padrão. Durante um ensaio laboratorial de um elemento estrutural sujeito a incêndio, aquele tem que garantir a função de estabilidade e acções mecânicas durante determinado tempo de ensaio sem colapsar. Barreiras, tais como lajes e paredes, têm adicionalmente que garantir para além do critério de integridade (R), o de isolamento térmico (I) para prevenir a propagação do incêndio para além do compartimento de origem, devendo a temperatura na face fria não ultrapassar determinado valor. Complementarmente o elemento não deverá fissurar para garantir estanquidade aos fumos e gases quentes (E). É importante referir que o tempo associado à resistência ao fogo não expressa o tempo que uma estrutura tem que resistir a um fogo real, tal como a duração de um fogo real não poderá ser especificado com precisão.

Segundo o novo regulamento os elementos estruturais, de cada tipo de edifício, deverão possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de Suporte de Carga, R, isolamento térmico, I, e de estanquidade, E, durante todas as fases do incêndio, ou então uma Resistência padrão mínima (classe de Resistência).

Conhecendo se a Utilização tipo e a sua categoria de risco, poderá definir-se a resistência padrão mínima exigível através do Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Resistências Mínimas para cada Utilização-tipo em função da categoria de risco.

Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função do elemento estrutural
	1ª	2ª	3ª	4ª	
I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X	R30 REI30	R60 REI60	R90 REI90	R120 REI120	Apenas suporte Suporte e compartimentação
II, XI e XII	R60 REI60	R90 REI90	R120 REI120	R180 REI180	Apenas suporte Suporte e compartimentação

Com a informação do Quadro 2.3 poder-se-á saber as exigências definidas no regulamento de SCIE assim como o seu escalão de tempo. Sendo estas:

- Letra R - Exigência de estabilidade, a estrutura deverá manter a sua capacidade de suporte;
- Letra E – Estanqueidade, na face não exposta dos elementos de compartimentação, para chamas e gases;
- Letra I - Isolamento térmico, na face não exposta dos elementos de compartimentação;

Cada exigência deverá cumprir escalões de tempo (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360), fazendo cumprir a sua função pelo período de tempo mínimo indicado em minutos. Por exemplo, a resistência é avaliada pelo tempo que decorre desde o início do processo térmico normalizado (por exemplo, a curva de incêndio padrão ISO 834) a que são submetidos os elementos estruturais, até deixarem de satisfazer as funções para as quais foram projectados.

2.3. EUROCÓDIGO

Quer no novo Regulamento (RSCIE) quer nos antigos, nada é falado acerca dos processos de cálculo para verificar as resistências requeridas. Apenas se sugerem as exigências estruturais que se devem cumprir. De forma a se poder fazer um estudo da Resistência da estrutura, terá que se recorrer aos modelos definidos no Eurocódigo.

O Eurocódigo consiste em cerca de quarenta normas, com o objectivo de uniformizar as normas, em estruturas, no território Europeu. No caso do cálculo de estruturas de Betão, para o caso de incêndio, destacam-se os 2 seguintes:

- Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1] – Cálculo Estrutural ao Fogo, onde se estabelecem as regras para o cálculo de estruturas de betão armado e pré esforçado em situação de incêndio e se definem as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais em função da temperatura;
- Eurocódigo 1, Parte 1-2 [3] – Acções em Estruturas Sujeitas a Incêndio, onde se faz a caracterização das acções térmicas.

Segundo o Eurocódigo 2, Parte 1-2 [1], existe a possibilidade de estudo de estruturas em 3 níveis de complexidade:

- Análise de elemento isolado, onde acções indirectas do fogo pelo contacto com outros elementos não são consideradas;
- Análise de parte da estrutura, onde as interacções entre elementos já são consideradas mas sendo consideradas constantes ao longo do tempo;
- Análise global da estrutura onde as acções directas e indirectas são consideradas, no entanto por ser um método bastante complexo, na generalidade dos casos não é utilizado;
- Ensaio de resistência ao fogo, que podem ser a escala real ou de amostras.

Em relação aos procedimentos de cálculo são apresentados também três com crescentes níveis de complexidade:

- Definição dos detalhes estruturais atendendo a soluções de projecto baseadas em valores tabelados;
- Métodos simplificados de cálculo para elementos tipo específicos;
- Métodos avançados de cálculo para simulação do comportamento estrutural dos elementos, subestruturas ou estruturas completas.

Em cada um dos níveis de estudo existe uma interligação com os modelos de incêndios e o método de estudo. Por exemplo, enquanto que os valores tabelados se baseiam na curva de incêndio padrão, os métodos simplificados e avançados de cálculo podem ser usados para estas e para as curvas paramétricas de incêndio.

Em qualquer dos modelos de cálculo preconizados, a avaliação resulta, como não podia deixar de ser, do lado da segurança em comparação com o expectável comportamento real do edifício. Os dois primeiros métodos são de uso fácil, minimizando o risco de má utilização. Contudo, devido à sua simplicidade, o seu campo de aplicação tem que estar bem definido, já que perde a validade fora das condições para os quais foram desenvolvidos.

O Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], fornece também os valores de cálculo para as propriedades dos materiais e os factores de combinação para as acções.

Para a determinação de uma suficiente resistência ao fogo o Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], define estas metodologias:

i. Método dos Valores Tabelados

Este método é baseado em tabelas que fornecem valores mínimos das dimensões da secção e das distâncias aos eixos das armaduras longitudinais das faces sujeitas a incêndio em função da resistência ao fogo que se pretende.

No Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], são apresentadas estas tabelas, que variam para cada tipo de elemento e características, e as suas regras de aplicação.

A função de compartimentação (estanquidade às chamas e gases quentes e isolamento térmico) das paredes e lajes é garantida pela utilização dos Valores Tabelados respectivos.

ii. Métodos Simplificados de Cálculo

O Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], fornece vários métodos simplificados de cálculo para avaliar a resistência dos elementos estruturais de betão armado em qualquer instante e para qualquer tipo de incêndio. Estes métodos são baseados na redução da secção, remanescendo as partes frias do elemento. Contudo, os perfis de temperatura na secção e dados relativos às alterações das propriedades materiais com a temperatura são igualmente necessários. São apresentadas as duas tipologias de cálculo simplificado:

- O Método da isotérmica de 500°C que corresponde a uma redução geral da dimensão da secção correspondente à zona afectada pelo incêndio nas superfícies expostas. A espessura da zona afectada corresponde à média da profundidade da isotérmica de 500°C na zona em compressão da secção. O betão com temperaturas superiores a 500°C é assumido como não contribuinte para a capacidade de carga do elemento, enquanto a restante secção mantém os valores iniciais de resistência e módulo de elasticidade. Considerando a redução da resistência das armaduras, a capacidade de carga última pode ser determinada com métodos convencionais de cálculo, tal como o especificado no Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1].
- O Método das Zonas divide a secção em várias zonas, de espessura equivalente, em número mínimo de três e avalia a redução da resistência em cada zona. É calculada depois uma espessura degradada do elemento que se despreza, sendo esta dependente do tipo de elemento e das condições de exposição ao incêndio. Para a curva de incêndio padrão, o Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], fornece inúmeros diagramas que permitem uma

determinação rápida da secção reduzida. Este método é mais preciso, embora mais laborioso comparado com o Método da isotérmica de 500°C.

Para a determinação dos perfis de temperatura necessários, recorre-se às isotérmicas publicadas para inúmeras secções e para incêndios padrão: Eurocódigo 2, Parte 1-2, Anexo A, [1]. Para outros tipos de incêndio, os perfis de temperatura deverão ser determinados utilizando modelos numéricos específicos, como por exemplo o SAFIR, o Diana, o ANSYS, SUPER-TEMPCALC, etc.

Na Figura seguinte são apresentadas as relações entre os níveis de estudo, os modelos de incêndio e os métodos de cálculo:

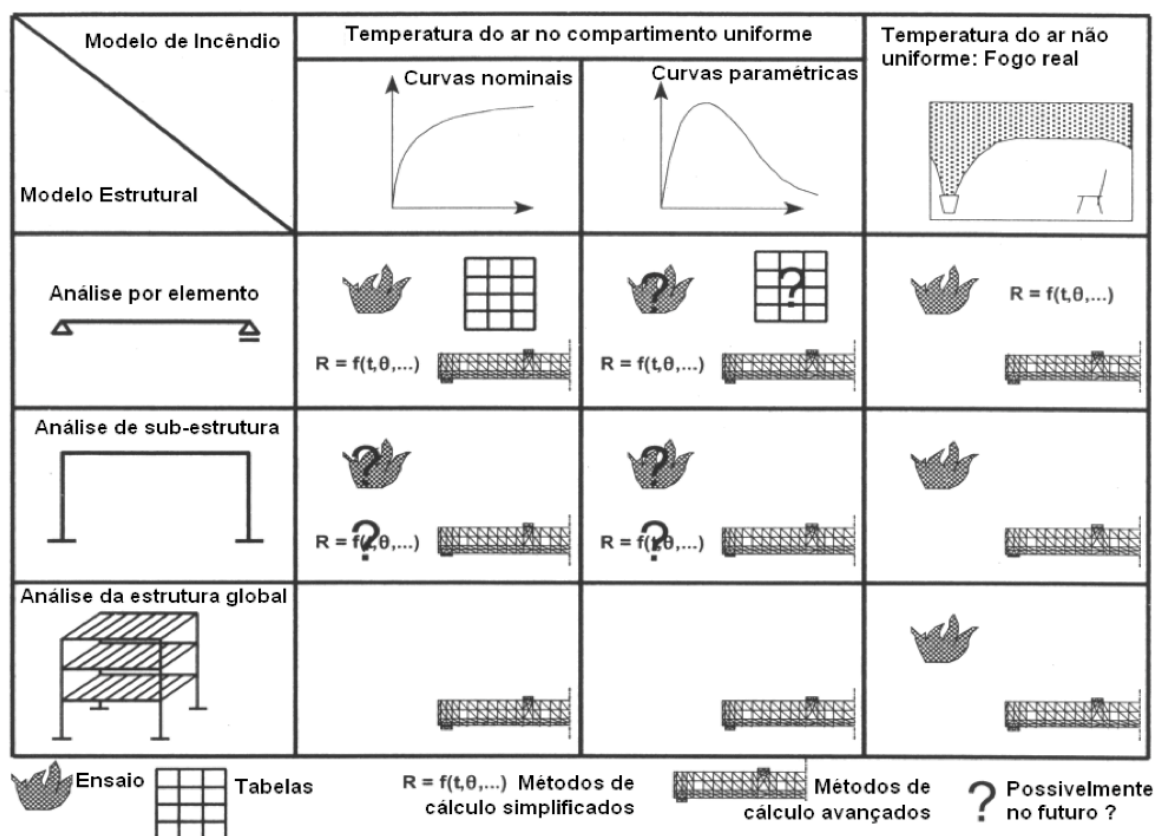


Fig. 2.5 – Esquematização dos modelos de cálculo, [2].

3

MÉTODOS TABELADOS E MÉTODOS SIMPLIFICADOS

3.1. INTRODUÇÃO

No presente Capítulo são apresentados os métodos tabelados e simplificados segundo o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]. Para aplicação de tais métodos serão necessárias as características térmicas e mecânicas dos materiais a altas temperaturas, em particular do Betão e do Aço, usando como referência as propostas dadas pelo Eurocódigo.

Nas condições de incêndio, as propriedades dos materiais em função da temperatura devem ser tomadas em conta. Tal como a condição da curva de incêndio padrão, as propriedades são também definidas entre os 20°C e 1200°C.

Os materiais de construção quando expostos ao incêndio alteram as suas propriedades naturais e em certos casos, sujeitar-se-ão à fluência, decomposição, desidratação e perda material. As propriedades materiais mais relevantes no caso do betão é sofrerem alterações físicas (perda de humidade e destacamento de partes de material, “spalling”) mecânicas (tensão de tracção e compressão, módulo de elasticidade, relações tensão-extensão, coeficiente de dilatação térmica e fluência) e térmicas (densidade, calor específico e condutibilidade). No caso do aço, as propriedades materiais a considerar variáveis a altas temperaturas são as mesmas do betão exceptuando-se a fluência.

Além de todos os cálculos efectuados, para a verificação de segurança estrutural, deverá ser feita uma verificação da ocorrência do destacamento explosivo do betão (“Spalling”). Para tal irá limitar-se as dimensões mínimas das secções dos elementos estruturais nas zonas de compressão. O gráfico da Figura 3.1, representa a relação entre esses limites com a tensão de compressão ($\sigma_{c,fi}$), calculada para as combinações de acções em situação de incêndio, que deverá ser garantida .

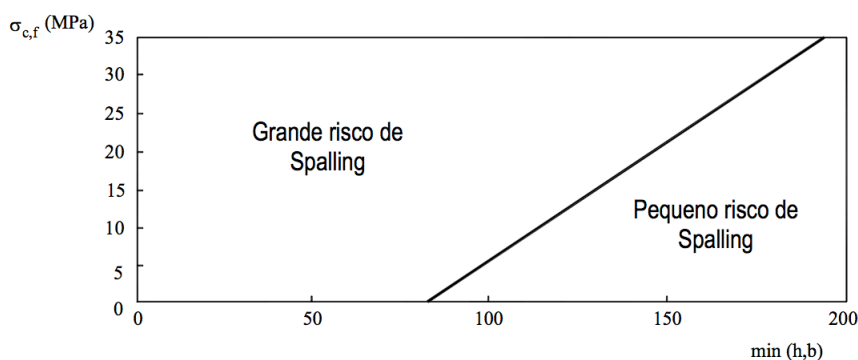


Fig. 3.1 – Relação entre $\sigma_{c,fi}$ e h (ou b) para o risco de “Spalling”, [4].

3.2. ACÇÕES E CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS E MECÂNICAS DO BETÃO E DO AÇO A ALTAS TEMPERATURAS

Grande parte das propriedades térmicas e mecânicas do betão e do aço aqui expressas são apresentadas no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], sendo sempre consideradas para valores característicos. Refira-se que alguns destes valores têm-se alterado ligeiramente de versão para versão dos Eurocódigos, [4]. Os valores de cálculo das propriedades térmicas e mecânicas dos betões e dos aços em situação de incêndio são expressas da seguinte forma:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k(\theta)}}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.1)$$

Em que:

$X_{d,fi}$ - Valor de cálculo das propriedades térmicas ou mecânicas

$X_{k(\theta)}$ - É o valor característico da propriedade em situação de incêndio, função da temperatura

No caso apenas das propriedades mecânicas é expresso pela expressão:

$$X_{k(\theta)} = K_{(\theta)} \cdot X_k. \quad (3.2)$$

Em que:

$K_{(\theta)}$ - Factor de redução da resistência ou deformação, função da temperatura

X_k - Valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente

$\gamma_{M,fi}$ - Factor parcial de segurança para a propriedade em causa em situação de incêndio
(Pode-se tomar 1 para todas as propriedades)

A expressão (3.1) é aplicável se o incremento das propriedades for desfavorável para a segurança, se não for o caso deve usar-se a expressão seguinte:

$$X_{d,fi} = X_{k(\theta)} \cdot \gamma_{M,fi} \quad (3.3)$$

3.2.1. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O cálculo da resistência ao fogo de elementos com funções de suporte de cargas é composto pelas seguintes fases:

- Definição da acção térmica (tipo de incêndio);
- Definição das acções mecânicas a considerar em situação de incêndio (directas e indirectas);
- Cálculo da distribuição de temperatura nos elementos para o instante de incêndio t ;
- Determinação do valor de cálculo dos efeitos das acções (térmicas e mecânicas) em situação de incêndio no instante t , $E_{fi,d,t}$;
- Determinação do valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante t , $R_{fi,d,t}$;
- Verificação da condição (3.4)(no domínio da resistência podendo alternativamente ser no domínio do tempo ou da temperatura).

A verificação de segurança em estruturas sujeitas a incêndio consiste em verificar se o valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, é inferior ou igual à resistência de cálculo em situação de incêndio, $R_{d,fi}$, ou seja:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (3.4)$$

A acção do fogo é considerada uma acção de acidente, sendo que os efeitos das acções em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, podem ser determinados para valores quase-permanentes ou frequentes das acções variáveis. O Eurocódigo 1, Parte 1-2 [3], recomenda a utilização de valores quase-permanentes da acção variável, determinando-se os efeitos da acção do fogo, $E_{d,fi}$, através da seguinte combinação:

$$E_{d,fi} = \sum \gamma_{GA} G_k + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.5)$$

Em que:

- G_k – Valor característico das acções permanentes
- $\psi_{1,1}$ e ψ_2 – Coeficientes de combinação
- $Q_{k,1}$ – Valor característico da acção variável principal
- $Q_{k,i}$ – Valor característico das restantes acções variáveis
- A_d – Valor de cálculo da acção accidental, neste caso, representa o valor de cálculo das acções térmicas indirectas devido a incêndio
- γ_{GA} – Coeficiente parcial de segurança para as acções permanentes em situação de incêndio

Os valores coeficientes de combinação, definidos no Eurocódigo 1, parte1-1, [7], são os dados pelo quadro seguinte:

Quadro 3.1 – Coeficientes ψ_i , [7].

ACÇÕES VARIÁVEIS		EUROCÓDIGO		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Categoria A	Habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B	Escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C	Salas de espectáculo	0,7	0,7	0,6
Categoria D	Comércio	0,7	0,7	0,6
Categoria E	Armazéns	1	0,9	0,8
	Cobertura	0	0	0
	Neve	0,6	0,5	0
	Vento	0,6	0,5	0

A expressão (3.5) pode ser simplificada uma vez que o valor de cálculo da acção accidental em situação de incêndio pode não ser considerado numa análise de elementos estruturais simples como aquela que é realizada neste trabalho através de um método simplificado de cálculo. Assim, tendo-se $A_d=0$ e tomando o coeficiente parcial de segurança para as acções permanentes em situação de incêndio igual a 1, fica:

$$E_{d,fi} = \sum G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.6)$$

De acordo com o Eurocódigo 2 Parte 1-2, [1] os efeitos das acções em situação de incêndio podem ser calculados de forma simplificada, assim tem-se:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \times E_d \quad (3.7)$$

Em que:

- E_d – Valor dos efeitos das acções da combinação de estado limite último à temperatura ambiente (valor calculado em fase de dimensionamento)
 η_{fi} – Factor de redução

O factor de redução, η_{fi} , pode ser obtido através da expressão (3.8) ou simplificada pode ser considerado igual a 0,70.

$$\eta_{fi} = \frac{G_K + \psi_{fi} \times Q_{K,1}}{\gamma_G \times G_K + \gamma_{Q,1} \times Q_{K,1}} \quad (3.8)$$

A Figura 3.2 representa a variação do factor de redução, η_{fi} , em função da relação de cargas, $\xi = Q_{k,1}/G_k$, (relaciona a acção variável de base com as acções permanentes) para diferentes coeficientes de combinação, $\psi_{1,1}$.

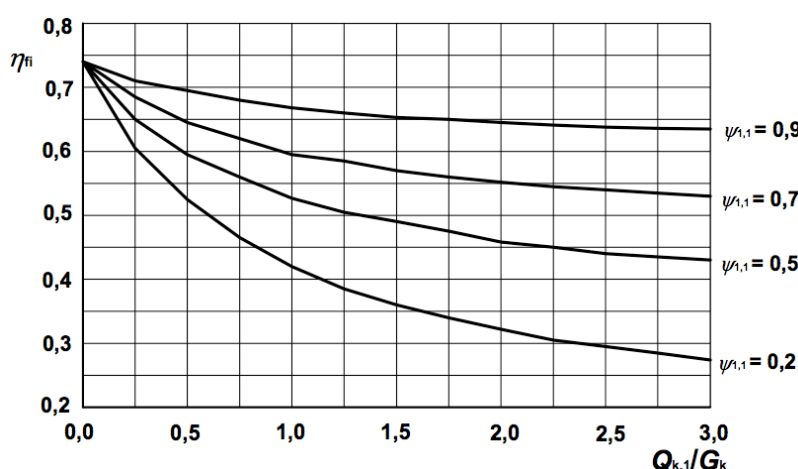


Fig.3.2 – Variação de η_{fi} , função de $\xi = Q_{k,1}/G_k$, para diferentes valores de $\psi_{1,1}$.

3.2.2. BETÃO

O Betão é um dos materiais que apresenta melhor comportamento à acção do fogo principalmente por ser mau condutor de temperatura, não arder (não se acrescentando à carga de incêndio), não produzir fumo ou gases tóxicos (reduzindo o risco de vida aos ocupantes da estrutura) e por apresentar um baixo decréscimo das suas características para temperaturas baixas.

Quando sujeito ao calor, o betão não responde apenas através de mudanças físicas como a expansão, mas também com alterações químicas. Esta resposta é particularmente complexa devido à não uniformidade do material. O betão é uma mistura de água, agregados e pasta de cimento, sendo que cada componente possui formas diferentes de reagir ao calor, como se pode ver no quadro seguinte:

Quadro 3.2 – Efeitos da temperatura nos constituintes do Betão, [8].

Temperatura do Betão[°C]	Mudanças provocadas pela Temperatura
100	Início expulsão da água pelos poros
250 - 400	Oxidação do aço, aparecimento do efeito de "Spalling"
450 - 550	Desidratação da Portlandite
550 - 600	Expansão térmica do quartzo
600 - 650	Descarbonatação do Calcário criando retracções
800 - 1200	Desintegração do calcário
1200	Desintegração completa do Betão

As propriedades térmicas e mecânicas serão apresentadas para betões correntes com inertes siliciosos e calcários com classes de resistência variável entre C12/15 e C50/60, para betões leves e para betões de alta resistência, com resistências entre 50 e 130MPa. O Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], divide estes betões de alta resistência em três classes:

- Classe 1 – C50/67 e C60/75;
- Classe 2 – C70/85 e C80/95;
- Classe 3 – C90/105.

As principais diferenças referenciadas por Phan e Carino [4] no comportamento ao fogo dos betões de alta resistência em relação a betões correntes são:

- A maior perda de resistência dos betões de alta resistência a altas temperaturas;
- A susceptibilidade dos betões de alta resistência ao “Spalling” para temperaturas abaixo dos 400°C.

Exceptuando-se estes aspectos, assume-se que as propriedades térmicas dos betões de alta resistência podem ser consideradas como betões correntes na avaliação de estruturas ao fogo.

As propriedades térmicas dos betões leves são distintas dos betões correntes, pelo que são aqui explicitadas.

3.2.2.1. Tensões de compressão e tracção

Estes parâmetros são fornecidos no Quadro 3.3 para betão com inertes calcários ou siliciosos e aplicáveis em modelos de cálculo linear ou não lineares, embora os possíveis ganhos de resistência na fase de arrefecimento não deva ser considerado. A Figura 3.3 apresenta graficamente os valores apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de betões correntes siliciosos e calcários sujeitos a elevadas temperaturas.

Temperatura do Betão [°C]	Betões correntes		Betões de alta resistência		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$		$f_{c,\theta} / f_{ck}$		
	Inertes siliciosos	Inertes calcários	Classe 1	Classe 2	Classe 3
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50	-	-	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	0,90	0,75	0,75
200	0,95	0,97	0,90	0,75	0,70
250	-	-	0,90	0,75	0,68
300	0,85	0,91	0,85	0,75	0,65
400	0,75	0,85	0,75	0,75	0,45
500	0,60	0,74	0,60	0,60	0,30
600	0,45	0,60	0,45	0,45	0,25
700	0,30	0,43	0,30	0,30	0,20
800	0,15	0,27	0,15	0,15	0,15
900	0,08	0,15	0,08	0,11	0,08
1000	0,04	0,06	0,04	0,08	0,04
1100	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A redução do valor característico da resistência de compressão do betão, função da temperatura é definida à custa do coeficiente $k_c(\theta)$ em que:

$$f_{ck,\theta} = k_c(\theta) \cdot f_{ck,20^\circ C} \quad (3.9)$$

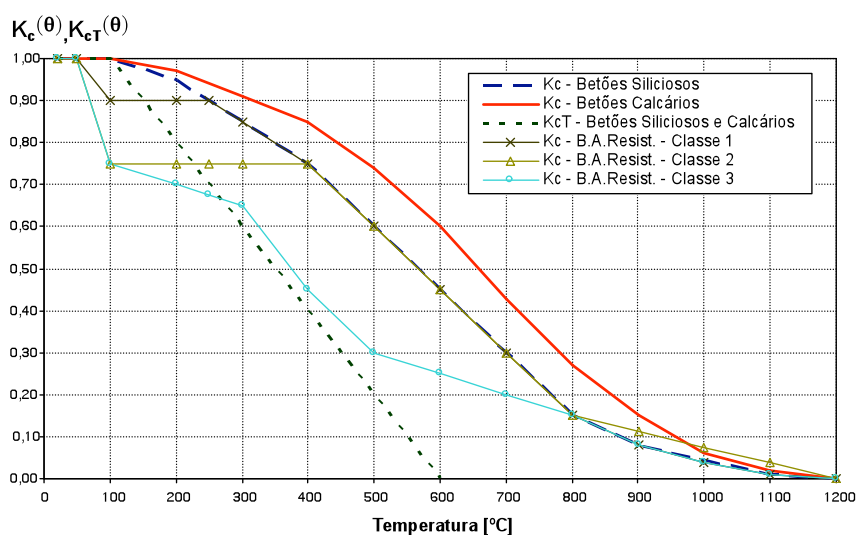


Fig. 3.3 – Coeficientes $k_c(\theta)$ e $k_{cT}(\theta)$ do betão com inertes siliciosos e calcários e betões de alta resistência para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.3, [4].

Na ausência de informação mais precisa os valores de $k_c(\theta)$ ($k_{cT}(\theta)$ para tracção) podem, para o betão com inertes siliciosos e conservativamente para outros tipos de inerte ser considerados os da Figura 3.3. Em todas as situações a tensão última de tracção deverá ser assumida como nula colocando-se do lado conservativo. Se em alguma circunstância for necessário considerar esta tensão, poderá, quer numa utilização de método de cálculo simplificado ou geral utilizar, os valores de $k_{cT}(\theta)$ da Figura 3.3.

3.2.3. Aço

O aço é normalmente utilizado em estruturas de betão de forma a compensar a fraca resistência à tracção do betão. Ao contrário do betão o aço apresenta um mau comportamento ao fogo uma vez que é um bom condutor térmico.

A variação das suas características mecânicas com a temperatura é muito importante na avaliação da capacidade resistente do betão armado porque normalmente é aplicado nos limites das secções de betão, ficando mais exposto às elevadas temperaturas.

O aço é um material bastante homogéneo, sendo a sua temperatura de fusão da ordem dos 1550°C. Como se pode verificar pelos gráficos das curvas de incêndio, a acção do fogo não atinge temperaturas tão elevadas em situações usuais.

Tal como o betão, as propriedades resistentes do aço mantêm-se pouco alteradas até temperaturas da ordem dos 400°C, mas acima destas o decaimento das propriedades é bastante mais elevado como se pode ver pelo Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de aços correntes de Classe N sujeitos a elevadas temperaturas.

Classe de Aço	Classe N						
Temperatura do Betão[°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$			$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente e Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio
	$\epsilon_{s,\theta} > 2\%$	$\epsilon_{s,\theta} > 2\%$	$\epsilon_{s,\theta} < 2\%$				
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Os valores de $k_s(\theta)$, função da temperatura são representados na Figura 3.4 para aços da Classe N. São consideradas curvas distintas para os aços laminados a quente e os aços endurecidos a frio. Os

valores das relações tensão limite de proporcionalidade $f_{sp,\theta}/f_{yk}$, a determinada temperatura e a relação entre o módulo de elasticidade a determinada temperatura e à temperatura ambiente, $E_{s,\theta}/E_s$, são igualmente representadas na Figura 3.5 para a mesma classes e tipos de aço.

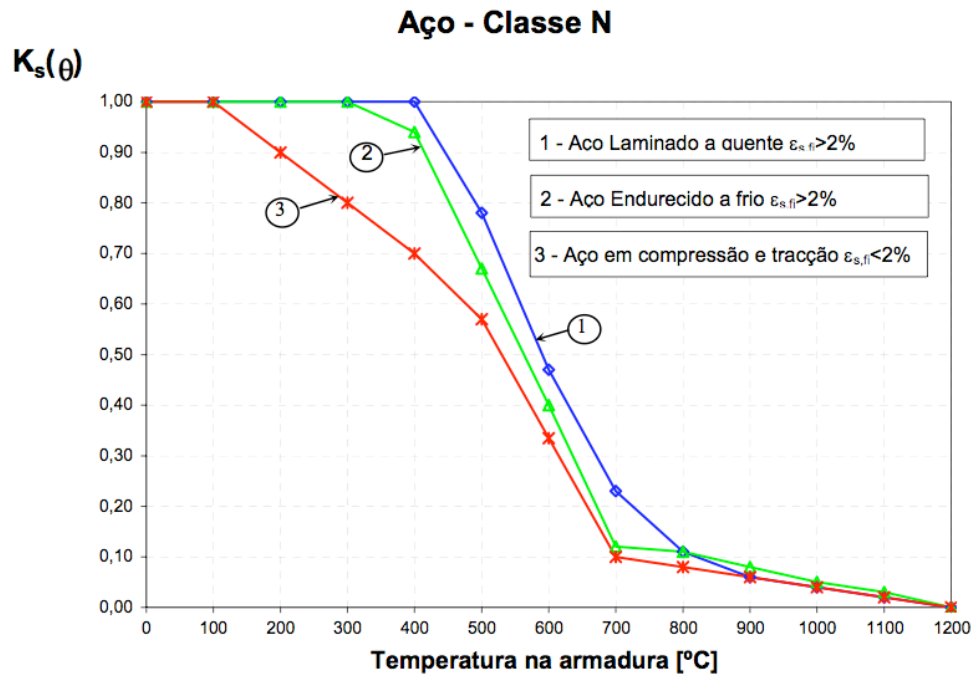


Fig. 3.4 – Coeficientes $k_s(\theta)$ do aço de Classe N para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4, [4].

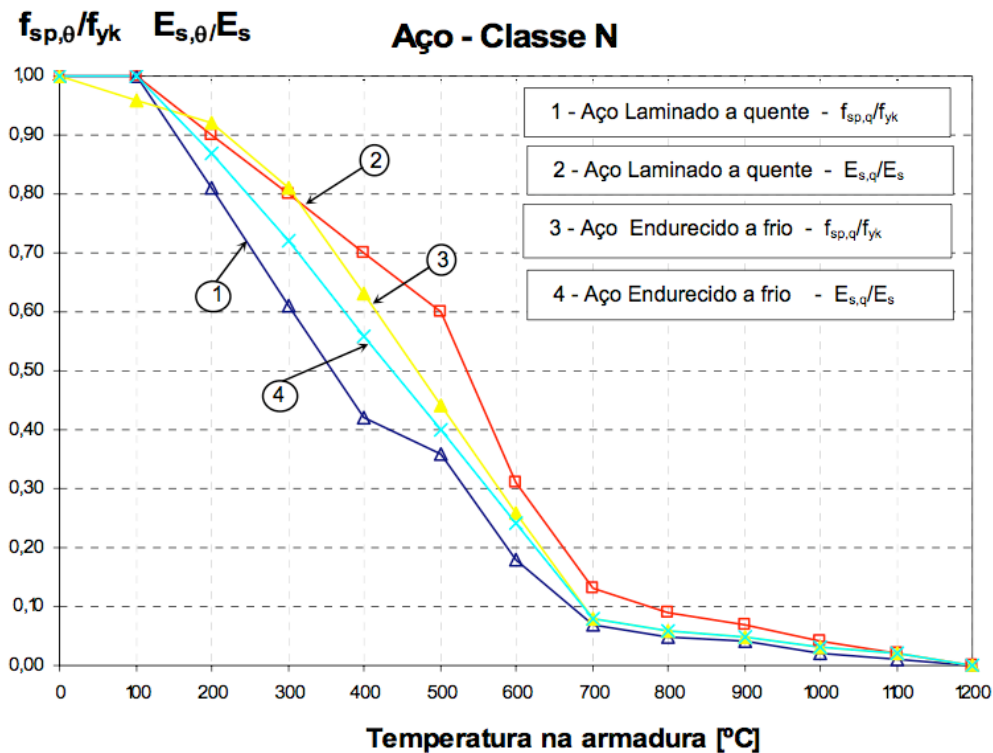


Fig. 3.5 – Coeficientes $f_{sp,\theta}/f_{yk}$ e $E_{s,\theta}/E_s$ do aço de Classe N para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4, [4].

3.3. MÉTODOS DOS VALORES TABELADOS

Este método consiste numa verificação das dimensões mínimas das secções e as distâncias dos eixos dos varões à face do elemento dessa secção sujeita a incêndio, numa análise estrutural isolada. As tabelas dão valores da resistência ao fogo até um máximo de 240 minutos de exposição a um fogo caracterizado pela curva de incêndio padrão (ISO 834). Estes valores foram conseguidos numa base empírica sustentada em análises experimentais e teóricas, apresentando valores conservativos não requerendo a verificação do esforço de torção, do esforço transversal ou do efeito “Spalling”.

As dimensões a , b e c , definidas na Figura 3.6, e aplicados nas tabelas, estão expressas em milímetros e aplicam-se a elementos de betão de densidade normal (peso específico entre 2000 e 2600 kg/m³) com inertes siliciosos. O Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], permite a redução de 10% dos valores das tabelas para o betão com inertes calcários ou betões leves.

Em situações em que os diâmetros, o número de camadas de varões e a classe dos aços variem, deve-se calcular a distância a pela expressão indicada na Figura 3.6. Os Valores Tabelados são baseados num nível de carregamento de referência, $\eta_{fr}=0,7$ (expressão 3.8 e Figura 3.2), exceptuando-se casos particulares relacionados com cada um dos tipos de elementos, e para uma temperatura crítica das armaduras de 500°C.

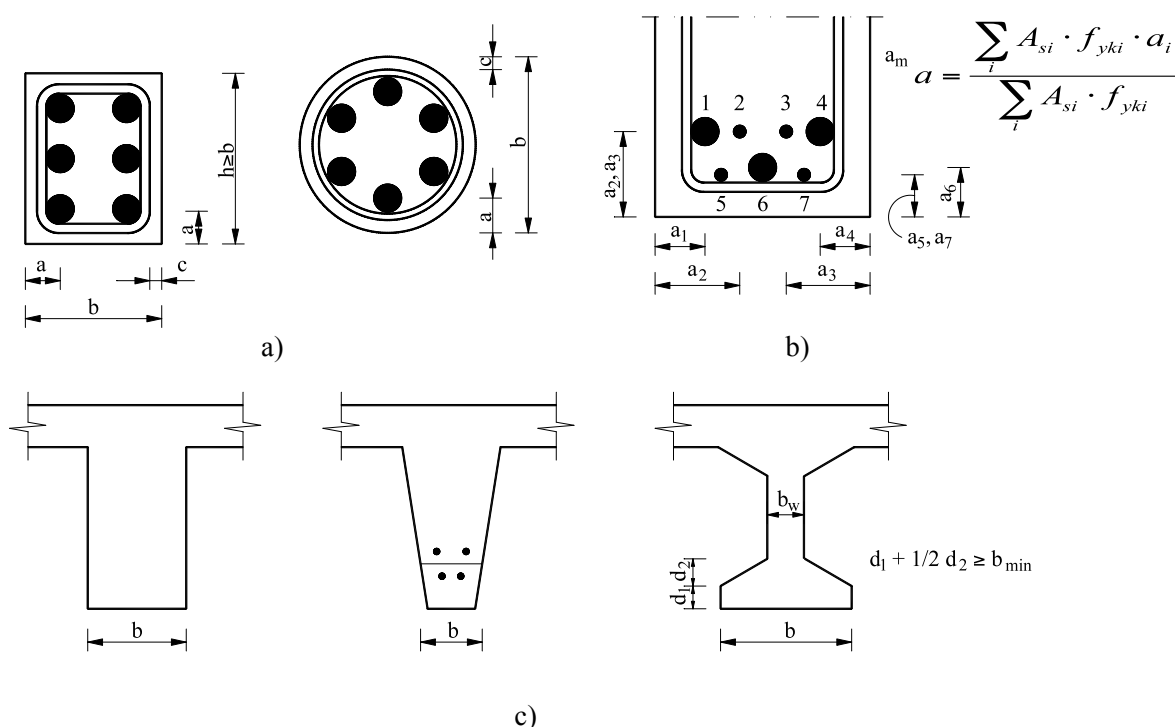


Fig. 3.6 - Definição das variáveis geométricas usadas nos quadros seguintes; a) distância da face exterior do elemento ao eixo das armaduras; b) menor dimensão da secção transversal ou dimensão de referência da viga; h - altura da viga; c) recobrimento nominal da armadura, [1].

Nas zonas dos elementos sujeitos à tracção quando lajes e vigas simplesmente apoiadas estão sujeitas a flexão simples e para temperaturas dos varões de aço diferentes da temperatura crítica de 500°C, o valor de a deverá ser alterado segundo o seguinte procedimento:

i) Avaliação da tensão no aço, $\sigma_{s,fi}$, para o valor da combinação de acções de acidente para a situação de incêndio, $E_{d,fi}$, sendo feita pela seguinte expressão:

$$\sigma_{s,fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cdot \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \quad (3.10)$$

Em que,

- γ_s - Factor parcial de segurança para o aço (=1,15 segundo o Eurocódigo 2, parte 1-1, [9])
- $A_{s,req}$ - Área de aço requerido para o estado limite último de acordo com Eurocódigo 2, parte 1-1, [9]
- $A_{s,prov}$ - Área de aço utilizada
- $E_{d,fi}$ - Pode ser calculada através da combinação de acções de acidente para a situação de incêndio (3.5) ou pela fórmula simplificada (3.7)
- E_d - Valor dos efeitos das acções da combinação de estado limite último à temperatura ambiente (valor calculado em fase de dimensionamento)

ii) Avaliação da temperatura crítica do aço θ_{cr} correspondente ao factor de redução $K_s(\theta_{cr}) = \sigma_{s,fi} / f_{yk}$, utilizando a Curva 1 da Figura 3.7, retirada do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], para o aço corrente ou as outras curvas para o aço de pré-esforço;

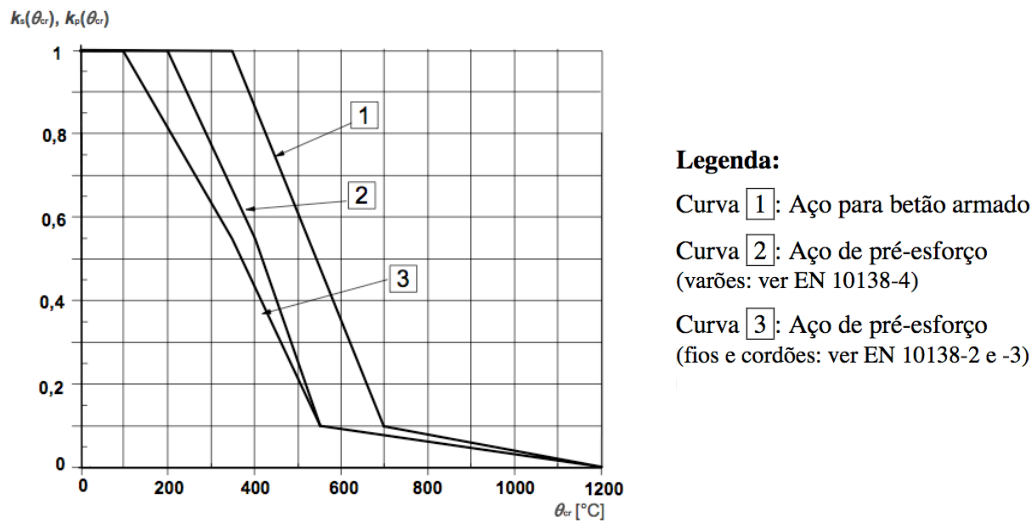


Fig. 3.7 – Curvas de referência para a temperatura crítica dos aços para betão armado e de pré-esforço, θ_{cr} , correspondente ao coeficiente de redução, [1].

iii) O ajuste do valor de a das tabelas para a nova temperatura crítica θ_{cr} é feito através da expressão:

$$\Delta a = 0,1 \cdot (500 - \theta_{cr}) \quad [\text{mm}] \quad 350^\circ\text{C} < \theta_{cr} < 700^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

A dimensão b pode, noutros casos, ser objecto de correcção para elementos sujeitos à tracção ou vigas em que θ_{cr} seja inferior a 400°C . A dimensão b deve, neste caso, ser incrementada da seguinte forma:

$$b_{\text{mod}} \geq b_{\text{min}} + 0,8 \cdot (400 - \theta_{cr}) \quad [\text{mm}] \quad (3.12)$$

Consideram-se os seguintes valores de temperatura crítica para os elementos pré-esforçados:

- 400°C para elementos varão de pré-esforço;
- 350°C para cordão ou fio de pré-esforço.

Se não for exigida uma verificação especial como a já referida para os elementos pré-esforçados sujeitos a tracção, as vigas e lajes pré-esforçadas deverão ver o valor de a incrementado do seguinte valor:

- 10 mm - para varões pré-esforçados correspondendo a $\theta_{cr} = 400^\circ\text{C}$;
- 15 mm - para cordões ou fio de pré-esforço correspondendo a $\theta_{cr} = 350^\circ\text{C}$.

Deverá ser tido em atenção que a verificação do recobrimento mínimo segundo o Eurocódigo 2, parte 1-1, [9], deverá ser verificada mesmo usando os valores tabelados, visto alguns desses valores existirem apenas para que se possa proceder a interpolações, aspecto contemplado no modelo numérico desenvolvido no âmbito desta dissertação. Também deve ser sempre tida em atenção que os métodos tabelados, apesar de serem de mais rápida aplicação, só são aplicáveis se se cumprir as suas regras de aplicação, reduzindo assim o seu interesse comparativamente com os métodos simplificados.

De seguida irá ser feita uma apresentação, para cada tipo de elemento estrutural, das regras e modo de aplicação para as respectivas tabelas.

3.3.1. PILARES

O Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], apresenta-nos dois métodos, Método A e B, que são aplicados apenas a pilares inseridos em estruturas de nós fixos. O Método A diz respeito a pilares sujeitos, maioritariamente à acção de esforço axial enquanto o Método B se refere a pilares sujeitos a momento flector e esforço axial.

O Método A apresenta valores mínimos, de a_{min} e b_{min} (Figura 3.6), em função do factor redução de carregamento, μ_{fi} , e o Método B irá apresentar os mesmos valores em função do nível de carregamento, n , e a relação mecânica da armadura, ω .

No anexo C do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], é também apresentado um conjunto de 9 tabelas com as mesmas regras de aplicação do Método B, os quadros são no entanto baseados no método indicado no Anexo B daquele mesmo documento. Neste trabalho designa-se este anexo como sendo o Método C.

O Método C aplica-se a pilares cujo comportamento estrutural é bastante influenciado pelos efeitos de segunda ordem em situação de incêndio, e fornece valores mínimos de a_{min} e b_{min} em função da relação mecânica da armadura, ω , do grau de importância do momento de primeira ordem aplicado, traduzido por um valor de excentricidade, e , pelo nível de carregamento, n , e pela esbelteza do pilar, λ . Apesar da apresentação daqueles valores mínimos em forma de tabela, estes inserem-se nos resultados obtidos por um método simplificado também indicados naquele anexo

3.3.1.1. Método A

Este método aplica-se apenas para pilares inseridos em estruturas de nós fixos submetidos maioritariamente a esforços axiais de compressão. É apresentado de seguida as suas condições de aplicação e os seus valores (Quadro 3.5):

- O comprimento efectivo do pilar em condições de incêndio:

$$l_{0,fi} \leq 3m$$

Em que,

$$\text{Em geral } l_{0,fi} \approx l_0$$

Se $R > 30\text{min}$ e estruturas de nós fixos

$$l_{0,fi} = 0,5l \quad (\text{Pisos intermédios})$$

$$l_{0,fi} = [0,5 ; 0,7]l \quad (\text{Último piso})$$

Em que l é o comprimento do pilar.

- Excentricidade sob incêndio (assume-se igual à temperatura ambiente),

$$e = \frac{M_{0Ed,fi}}{N_{0Ed,fi}} \leq e_{máx} \quad (3.13)$$

Em que,

$$e_{máx} \in [0,15; 0,4] b \text{ ou } h, \text{ sendo recomendado o valor de } 0,15$$

- Quantidade de armadura:

$$A_s < 0,04 A_c \quad (3.14)$$

Em que,

A_s - Área total de armadura

A_c - Área total de Betão

Quadro 3.5 – Método A - Dimensões mínimas dos pilares e distâncias mínimas do eixo dos varões à face exterior para pilares de betão armado ou pré-esforçado de secção rectangular ou circular, [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]							
	Largura b_{min} , distância ao eixo a							
	Exposição em mais de um lado						Num lado	
	$\mu_{fi}=0,2$		$\mu_{fi}=0,5$		$\mu_{fi}=0,7$		$\mu_{fi}=0,7$	
	b_{min}	a	b_{min}	a	b_{min}	a	b_{min}	a
R 30	200	25	200	25	200 300	32 27	155	25
R 60	200	25	200 300	36 31	250 350	46 40	155	25
R 90	200 300	31 25	300 400	45 38	350 450	53 40**	155	25
R 120	250 350	40 35	350 450	45** 40**	350 450	57** 51**	175	35
R 180	350	45**	350	63**	450	70**	230	55
R 240	350	61	450	75**			295	70

Notas (**) - Utilização mínima de 8 varões;

Este método permite ainda obter valores distintos aos apresentados na tabela anterior, usando se expressões seguintes:

$$R = 120 \cdot \left[(R_{nfi} + R_a + R_l + R_b + R_n) / 120 \right]^{1,8} \quad (3.15)$$

$$R_{nfi} = 83 \cdot \left[1,00 - \mu_{fi} \frac{1 + \omega}{(0,85 / \alpha_{cc}) + \omega} \right] \quad (3.16)$$

$$R_a = 1,60 \cdot (a - 30) \quad (3.17)$$

$$R_l = 9,60 \cdot (5 - l_{0,fi}) \quad (3.18)$$

$$R_b = 0,09 \cdot b' \quad (3.19)$$

$$R_n = 0 \quad \text{para } n=4 \quad (\text{varões nos cantos})$$

$$R_n = 12 \quad \text{para } n>4$$

Em que,

$$\begin{aligned} a &\in [25;80] \text{ mm} && \text{- Distância do eixo das armaduras longitudinais à face} \\ l_{0,fi} &\in [2;6] \text{ m} && \text{- Comprimento efectivo do pilar sujeito a incêndio, (=2 se } l < 2) \\ b' &= 2 \cdot A_c / (b + h) && \end{aligned} \quad (3.20)$$

- Para secções rectangulares b x h ou circulares de diâmetro b

$$b' \in [200 ; 450] \text{ mm e } h \leq 1,5 \cdot b$$

$$\alpha_{cc} \in [0,8 ; 1,0] \quad \text{- Coeficiente de resistência à compressão tendo em conta os efeitos a longo prazo e os efeitos desfavoráveis como a carga é aplicada (Secção 3.1.6 do Eurocódigo 2, parte 1-1, [9])}$$

$$\omega = A_s \cdot f_{yd} / A_c \cdot f_{cd} \quad (3.21)$$

$$\omega \quad \text{- Relação mecânica de armadura à temperatura ambiente}$$

$$\mu_{fi} = N_{Ed,fi} / N_{Rd} \quad (3.22)$$

$$\mu_{fi} \quad \text{- Factor de redução em função do nível de carregamento, função da combinação de acções, resistência à compressão e resistência à flexão com efeito de segunda ordem.}$$

e,

$$N_{Ed,fi} = \eta_{fi} N_{Ed} \quad (3.23)$$

$$N_{Ed,fi} \text{ - Acção axial de projecto em situação de incêndio}$$

$$N_{Rd} \quad \text{- Valor de cálculo do esforço axial resistente à temperatura ambiente. Cálculo segundo EC2-1.2 com } \gamma_M \text{ à temperatura ambiente (Secção 2.4.2.4 do Eurocódigo 2, parte 1-1, [9] - } \gamma_c = 1,2 \text{ e } \gamma_s = 1,0 \text{)}$$

$$N_{Ed} \quad \text{- Valor de cálculo do esforço axial à temperatura ambiente para a combinação fundam. de acções 6.10 (Secção 6.4.3.3 do Eurocódigo 0, [10])}$$

Nota: Pode ser utilizado o factor η_{fi} em vez de μ_{fi} como simplificação desde que η_{fi} assuma que o pilar está completamente carregado à temperatura ambiente.

3.3.1.2. Método B

Este método aplica-se apenas para estruturas de nós fixos submetidos momento flector e carga axial, onde os momentos de segunda ordem influenciam significativamente em situação de incêndio e para valores de esbelteza até 30. São apresentadas de seguida as suas condições de aplicação e os seus valores (Quadro 3.6):

- Nível de carregamento à temperatura ambiente,

$$n = \frac{N_{0Ed,fi}}{0,7 \cdot (A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{yd})} \quad (3.24)$$

- Excentricidade sob incêndio (assume-se igual à temperatura ambiente),

$$e = \frac{M_{0Ed,fi}}{N_{0Ed,fi}} \quad (3.25)$$

Onde se considerou,

$$e/b \leq 0,25 \quad \text{e} \quad e_{máx} = 100mm$$

- Esbelteza do pilar sob incêndio (assume-se igual à temperatura ambiente),

$$\lambda_{fi} = \frac{l_{0,fi}}{i} \quad (3.26)$$

- $\lambda_{fi} \leq 30$ o que cobre a generalidade dos pilares em edifícios

Em que,

$l_{0,fi}$	- Comprimento efectivo do pilar em situação de incêndio
b	- Menor dimensão do pilar de secção rectangular ou diâmetro
$M_{0Ed,fi}$ e $N_{0Ed,fi}$	- valores de cálculo do Momento de primeira ordem e carga axial em situação de incêndio
i	- Raio de giração.
$N_{0Ed,fi} = 0,7 \cdot N_{0Ed}$	- $\eta_{fi}=0.7$ se η_{fi} não for calculado explicitamente
$\lambda_{fi} \approx \lambda$	- Se $R > 30$ $l_{0,fi} = 0,5l$ - Pisos intermédios $l_{0,fi} = [0,5 ; 0,7]l$ - Último Piso λ_{fi} - Esbelteza em situação de incêndio λ - Esbelteza à temperatura ambiente

Como é uma simplificação segura, o comprimento efectivo do pilar para condições de incêndio pode ser tomado igual a l_0 à temperatura ambiente.
Quando $A_s > 0,02A_c$, é exigida adequada distribuição de armadura na secção

Quadro 3.6 - Método B - Dimensões mínimas dos pilares e distâncias mínimas do eixo dos varões à face exterior para pilares de betão armado de secção rectangular ou circular, [1].

Resistência ao Fogo	Relação mecânica da armadura, ω	Dimensões mínimas [mm] Largura b_{min} , distância ao eixo a			
		n=0,15	n=0,3	n=0,5	n=0,7
R30	0,100	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	300/30:350/25*
	0,500	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/25*
	1,000	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:300/25*
R60	0,100	150/30:200/25*	200/40:300/25*	300/40:500/25*	500/25*
	0,500	150/25*	150/35:200/25*	250/35:350/25*	350/40:550/25**
	1,000	150/25*	150/30:200/25*	200/40:400/25*	300/50:600/30
R90	0,100	200/40:250/25*	300/40:400/25*	200/50:550/25*	550/40:600/25*
	0,500	150/35:200/25*	200/45:300/25*	300/45:550/25*	500/50:600/40
	1,000	200/25*	200/40:300/25*	250/40:550/25*	500/50:600/45
R120	0,100	250/50:350/25*	400/50:550/25*	550/25*	550/60:600/45
	0,500	200/45:300/25*	300/45:550/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50
	1,000	200/40:250/25*	250/50:400/25*	450/45:600/25*	600/60
R180	0,100	400/50:500/25*	500/60:550/25*	550/60:600/30	(1)
	0,500	300/45:450/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50	600/75
	1,000	300/35:400/25*	450/50:550/25*	500/60:600/45	(1)
R240	0,100	500/60:550/25*	550/40:600/25*	600/75	(1)
	0,500	450/45:500/25*	550/55:600/25*	600/70	(1)
	1,000	400/45:500/25*	500/40:600/30	600/60	(1)

Notas (**) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;
(1) - Exige dimensões superiores a 600mm. É exigido uma avaliação de encurvadura.

3.3.1.3. Método C (Método simplificado de cálculo).

Apesar da configuração dos quadros apresentados no Anexo C do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], estes dados reflectem a aplicação do método simplificado de cálculo indicado no Anexo B da mesma norma, e não ao método tabelado aplicado a pilares. Contudo, como a sua aplicação é idêntica aos métodos tabelados foi considerado neste trabalho como sendo tabelado.

As regras de aplicação destas tabelas são idênticas as utilizadas no Método B, apresenta-se previamente no Quadro 3.7, a listagem com os parâmetros que caracterizam todas as 9 tabelas apresentados naquela norma, e o Quadro 3.8. No Anexo A1 são apresentadas as 8 restantes.

Quadro 3.7 - Método baseado na estimativa da curvatura – Parâmetros de caracterização de cada quadro apresentado no Anexo C do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

Quadros	Relação mecânica de armadura	Momento de primeira ordem	
	ω	e	
Quadro C.1	0,1	=0,025b	$\geq 10\text{mm}$
Quadro C.2	0,1	=0,25b	$\leq 100\text{mm}$
Quadro C.3	0,1	=0,5b	$\leq 200\text{mm}$
Quadro C.4	0,5	=0,025b	$\geq 10\text{mm}$
Quadro C.5	0,5	=0,25b	$\leq 100\text{mm}$
Quadro C.6	0,5	=0,5b	$\leq 200\text{mm}$
Quadro C.7	1	=0,025b	$\geq 10\text{mm}$
Quadro C.8	1	=0,25b	$\leq 100\text{mm}$
Quadro C.9	1	=0,5b	$\leq 200\text{mm}$

Quadro 3.8 –Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,1$. Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,025b$ com $e \geq 10\text{mm}$) [1].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm] Largura b_{\min} , distância ao eixo a Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	40	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	50	150/25*	150/25*	150/25*	200/25*
	60	150/25*	150/25*	200/25*	250/25*
	70	150/25*	150/25*	250/25*	300/25*
	80	150/25*	200/25*	250/30:300/25*	350/25*
R60	30	150/25*	150/25*	200/25	200/30:250/25*
	40	150/25*	150/25*	200/25	250/25*
	50	150/25*	200/25	250/25	300/25*
	60	150/25*	200/40:250/25*	250/40:300/25*	350/30:400/25**
	70	200/25	250/30:300/25*	300/40:350/25*	450/35:550/25*
	80	200/30:250/25*	250/40:300/25*	400/30:450/25*	550/60:600/35
R90	30	150/25*	200/25*	200/50:250/25*	250/30:300/25*
	40	150/35:200/25*	200/30:250/25*	250/25*	300/25
	50	200/25*	250/25*	300/25*	350/50:400/25*
	60	200/35:250/25*	250/40:300/25*	350/35:400/25*	450/50:550/25*
	70	250/25*	300/35:350/25*	400/45:550/25*	600/40
	80	250/30:300/25*	350/35:400/25*	550/40:600/25*	(1)
R120	30	200/25*	250/25*	250/25*	300/45:350/25
	40	250/25*	250/25*	300/25*	400/25*
	50	250/25*	300/25*	350/50:400/25*	450/50:500/25*
	60	250/25*	350/25*	450/40:500/25*	550/50
	70	250/50:300/25*	400/25*	500/60:550/25*	(1)
	80	300/25*	450/40:500/25*	600/45*	(1)
R180	30	250/25*	250/25*	350/25*	400/50:450/25*
	40	250/25*	300/30:350/25*	400/25*	450/50:500/25*
	50	250/50:300/25*	350/50:400/25*	450/40:500/25*	550/60:600/35
	60	300/40:350/25*	450/25*	550/40:600/25	(1)
	70	350/30:400/25*	500/25*	600/80	(1)
	80	400/30:450/25*	550/45:600/25*	(1)	(1)
R240	30	250/25*	350/25*	450/25*	500/40:550/25*
	40	300/25*	400/25*	500/25*	600/25*
	50	350/25*	450/25*	550/50:600/25*	(1)
	60	400/25*	500/60:550/25*	600/80	(1)
	70	450/25*	600/25*	(1)	(1)
	80	500/25*	600/80	(1)	(1)

Notas (**) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;
(1) - Exige dimensões superiores a 600mm. É exigido uma avaliação de encurvadura.

3.3.2. PAREDES

3.3.2.1. Paredes sem funções de suporte de cargas

O Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], faz uma distinção entre paredes com funções estruturais e paredes sem função de suporte de carga. Estas últimas apenas vão ter que cumprir os critérios de isolamento, I, e de estanquidade, E. Para a sua aplicação a única condição será de modo a evitar deformações térmicas excessivas e rotura entre a parede e laje exigindo-se uma relação de altura livre e espessura da parede, com valor inferior a 40.

Quadro 3.9 - Dimensões mínimas de paredes sem funções de suporte de cargas [1].

Classe de resistência ao fogo	Espessura mínima da parede [mm]
EI 30	60
EI 60	80
EI 90	100
EI 120	120
EI 180	150
EI 240	175

3.3.2.2. Paredes com funções estruturais

As paredes com funções estruturais devem assegurar a condição de resistência ao fogo REI que está dependente da espessura da parede, da distância do eixo das armaduras ao exterior e do nível do carregamento. Os aspectos referidos para as paredes sem função de suporte de carga, têm igualmente que ser verificados. Aparecem pela primeira vez especificações para as paredes que tenham que respeitar o critério de resistência ao impacto (Critério M - EN 1363 parte 2) em que o valor de a deverá ser pelo menos de 25mm e as espessuras mínimas das paredes terão de ser, [4]:

- 200mm - Paredes não armadas;
- 120mm - Paredes armadas não resistentes;
- 140mm - Paredes resistentes.

Quadro 3.10 - Dimensões mínimas das paredes resistentes de betão e distância ao eixo, a , [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]							
	Espessura da parede e , distância ao eixo a							
	$\mu_{fi}=0,35$				$\mu_{fi}=0,7$			
	Parede exposta num lado		Parede exposta nos dois lados		Parede exposta num lado		Parede exposta nos dois lados	
REI 30	100	10*	120	10*	120	10*	120	10*
REI 60	110	10*	120	10*	130	10*	140	10*
REI 90	120	20*	140	10*	140	25	170	25
REI 120	150	25	160	25	160	35	220	35
REI 180	180	40	200	45	210	50	270	55
REI 240	230	55	250	55	270	60	350	60

Notas: (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente

3.3.3. VIGAS

Nesta secção são apresentadas as tabelas e regras para a aplicação dos métodos tabelados para vigas simplesmente apoiadas e vigas contínuas. Estas tabelas foram feitas considerando exposição ao fogo em 3 faces sendo que a face superior se encontra protegida pelo pavimento, a sua aplicação para 4 faces expostas é possível segundo algumas condições, também apresentadas.

Para vigas em “T” com alma de espessura variável (Figura 3.6c) e em “I”, o valor mínimo de b , medido ao nível duma linha que passa pelo centro de gravidade da secção das armaduras ou uma linha que passa a uma cota d_{ef} calculada pela expressão (3.27), respectivamente:

Em todos os casos há que respeitar a relação:

$$d_{ef} = d_1 + 0,5d_2 \geq b_{\min} \quad (3.27)$$

sendo b_{\min} o valor mínimo de b indicado nas tabelas;

Quando $b > 1,4b_w$ e $b \cdot d_{ef} < 2b_{\min}^2$ o valor de a indicado nas tabelas deve ser substituído por:

$$a_{ef} = a \left(1,85 - \sqrt{\frac{b_w}{b} \cdot \frac{d_{ef}}{b_{\min}}} \right) \geq a \quad (3.28)$$

Em que:

d_{ef} - é dado pela expressão (3.27).

b_{\min} - é a menor largura mínima da viga fornecida pelas tabelas.

No caso de vigas protegidas na face superior, as concentrações de temperaturas são mais elevadas nos cantos inferiores dos elementos. Por este motivo é feito um acréscimo de 10mm nas distâncias mínimas tabeladas dos eixos dos varões à face lateral do elemento dessa secção, para todos os valores das secções superiores até aos dados pelas colunas de cor cinzenta de cada quadro.

3.3.3.1. Vigas contínuas

A resistência ao fogo adequada para as vigas de betão armado ou pré-esforçado pode ser atingida se forem cumpridos os valores do Quadro 3.11, para vigas contínuas, no que diz respeito à largura mínima da viga, b_{\min} , e a distância do eixo da armadura ao exterior, a .

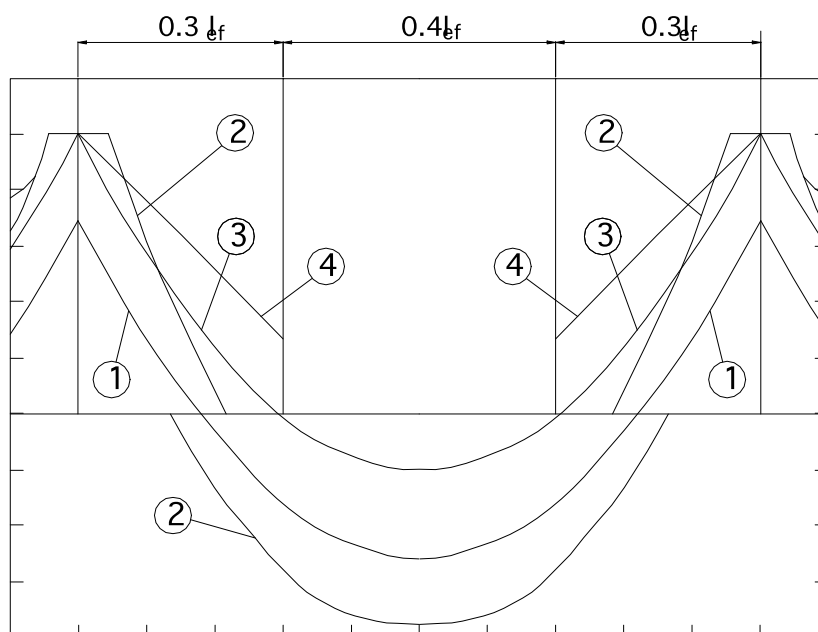
No entanto estes valores só serão válidos se a redistribuição das armaduras, em fase de dimensionamento, for conhecida e inferior a 15%. Se esta condição não se verificar as vigas devem ser consideradas como sendo simplesmente apoiadas.

A área da armadura superior sobre cada suporte intermédio para classes de resistência ao fogo R90 ou superior, para distâncias até $0,3 l_{eff}$ (Figura 3.8) não poderá ser menor que o valor dado pela expressão:

$$A_{s,req}(x) = A_{s,req}(0) \cdot \left(1 - 2,5 \frac{x}{l_{eff}} \right) \quad (3.29)$$

Em que:

- χ - É a distância da secção considerada até ao eixo do suporte ($\chi \leq 0,3 l_{eff}$)
- $A_{s,req}(0)$ - Área da armadura superior requerida na secção considerada (à distância χ) mas nunca inferior a $A_s(\chi)$ exigida pelo Eurocódigo 2, parte 1-1, [9]
- l_{eff} - É o vão efectivo definido no Eurocódigo 2, parte 1-1, [9], ou o maior dos vãos adjacentes



- (1) Diagrama de momentos flectores para a combinação de acção com incêndio e $t=0$;
- (2) Envolvente dos momentos flectores actuantes a serem suportados pelas armaduras de acordo com o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1];
- (3) Diagrama de momentos flectores nas condições de incêndio;
- (4) Envolvente dos momentos flectores resistentes de acordo com a expressão (3.29).

Fig. 3.8 - Envolvente dos momentos flectores resistentes em situação de incêndio, [4].

Nas vigas em “I”, a largura mínima da alma, numa extensão igual a duas vezes a altura da viga, contada para um e outro lados dos apoios intermédios, não deve ser menor do que a correspondente ao valor mínimo de b_{min} indicado na coluna sombreada do Quadro 3.11.

Para condições especiais de apoios intermédios com esforços transversos e momentos flectores negativos muito elevados é muito importante aumentar a espessura da viga e da alma de acordo com o Quadro 3.11 e atender às seguintes regras para resistências entre R120 e R240:

- Liberdade de rotação nos apoios;
- $V_{Ed} > 2/3 V_{Rd,max}$ no apoio intermédio,

Em que,

- $V_{Rd,máx}$ – Valor de cálculo do Esforço transversal máximo calculado de acordo com a secção 6 do Eurocódigo 2, parte 1-1, [9]
 V_{Ed} – Valor de cálculo do Esforço transversal aplicado à temperatura ambiente

Quadro 3.11 - Dimensões mínimas da largura da viga e da distância ao eixo dos varões para vigas contínuas de betão armado ou pré-esforçado, [1]

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]						
	Espessura da alma b_w			Possíveis combinações entre a e b_{min} em que a é a distância média e b_{min} a largura da viga			
	Classe WA	Classe WB	Classe WC				
R 30	80	80	80	$b_{min} = 80$ $a = 15^*$	160 12*		
R 60	100	80	100	$b_{min} = 120$ $a = 25$	200 12		
R 90	110	100	100	$b_{min} = 150$ $a = 35$	250 25		
R 120	130	120	120	$b_{min} = 200$ $a = 45$	300 35	400 35	500 30
R 180	150	150	140	$b_{min} = 240$ $a = 60$	400 50	550 50	600 40
R 240	170	170	160	$b_{min} = 280$ $a = 75$	500 60	650 60	700 50

- Notas (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;
 (1) - No caso de armadura disposta numa só camada, deve considerar-se $a_{sd}=a+10mm$ (o EC considera que a_{sd} pode ser igual a a para valores de b pelo menos correspondentes à coluna cinzenta);
 (2) - Para armaduras de pré-esforço há que fazer correcções (Secção 5.2 (5) do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]).

Quadro 3.12 - Larguras mínimas da viga e da alma para vigas em “I” de betão armado ou pré-esforçado, [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]
	Largura da viga b_{min} e Espessura da alma b_w
R 120	220
R 180	380
R 240	480

3.3.3.2. Vigas simplesmente apoiadas

A resistência ao fogo adequada para as vigas de betão armado ou pré-esforçado pode ser atingida se forem cumpridos os valores do Quadro 3.13 para vigas simplesmente apoiadas no que diz respeito à largura mínima da viga, b_{min} , e à distância do eixo da armadura ao exterior, a . Para vigas em “I” deve ainda verificar-se uma espessura mínima b_w para a alma.

Quadro 3.13 - Dimensões mínimas da alma de vigas simplesmente apoiadas e da distância ao eixo dos varões para vigas de betão armado ou pré-esforçado, [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]						
	Espessura da alma b_w			Possíveis combinações entre a e b_{min} em que a é a distância média e b_{min} a largura da viga			
	Classe WA	Classe WB	Classe WC				
R 30	80	80	80	$b_{min} = 80$ $a = 25$	120 20	160 15*	200 15*
R 60	100	80	100	$b_{min} = 120$ $a = 40$	160 35	200 30	300 25
R 90	110	100	100	$b_{min} = 150$ $a = 55$	200 45	300 40	400 35
R 120	130	120	120	$b_{min} = 200$ $a = 65$	240 60	300 55	500 50
R 180	150	150	140	$b_{min} = 240$ $a = 80$	300 70	400 65	600 60
R 240	170	170	160	$b_{min} = 280$ $a = 90$	350 80	500 75	700 70

- Notas
- (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;
 - (1) - No caso de armadura disposta numa só camada, deve considerar-se $a_{sd}=a+10\text{mm}$ (o Eurocódigo 2 considera que a_{sd} pode ser igual a a para valores pelo menos iguais à coluna cinzenta);
 - (2) - Para armaduras de pré-esforço há que fazer correcções (Secção 5.2(5) do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]);
 - (3) - $a_{ss} = a+10\text{mm}$ – distância do eixo dos varões extremos à face lateral da viga para vigas com um único nível de armaduras.

3.3.3.3. Vigas expostas nas quatro faces

No caso de vigas com todas as faces expostas ao fogo, podem aplicar-se as regras e tabelas anteriormente apresentadas desde que sejam observadas as seguintes disposições:

- Altura da viga não deve ser inferior ao valor de b_{min} correspondente à classe de resistência ao fogo em causa;
- A área da secção transversal da viga não deve ser inferior a $A_c > 2b_{min}^2$ e b_{min} é fornecido em qualquer dos quadros referidos para as tabelas correspondentes, simplesmente apoiadas ou contínuas;

3.3.4. LAJES

No caso das lajes, os métodos tabelados apenas consideram que estas estão expostas ao fogo na face inferior. No Quadro 3.14 irá fazer-se a verificação da espessura mínima h_s necessária para garantir a função de compartimentação (Critérios E e I) podendo esta função ser aumentada com o revestimento do pavimento, como referido na Figura 3.9.

No caso de a capacidade resistente, R , também ser necessária, o h_s usado irá ser a altura da laje que foi calculada no dimensionamento, à temperatura ambiente segundo Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], ou seja, no caso da Figura 3.9 irá ser a espessura h_l .

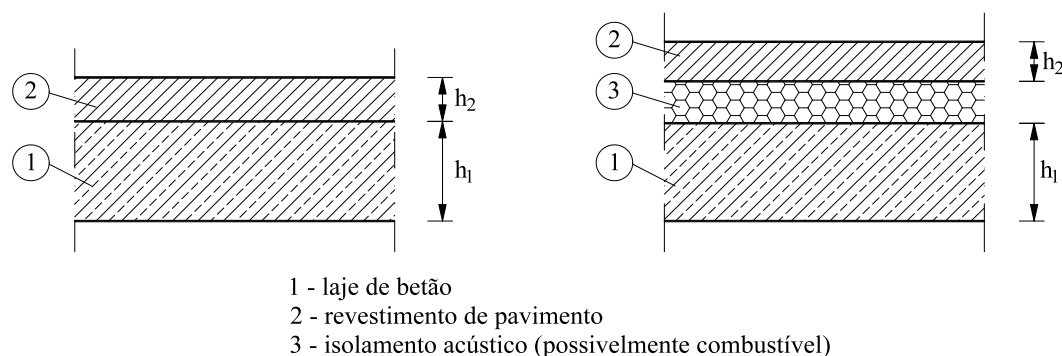


Fig. 3.9 – Definição das variáveis geométricas h_1 , h_2 e h_s ($h_s = h_1 + h_2$) para lajes de betão com revestimento de pavimento.

3.3.4.1. Lajes maciças simplesmente apoiadas

O Quadro 3.14 fornece valores de a (essencialmente associados às funções de suporte) e de h (associadas quer às funções de suporte e de compartimentação) para lajes simplesmente apoiadas para resistências ao fogo entre 30 e 240 minutos.

Quadro 3.14 - Dimensões mínimas da espessura da laje e da distância ao eixo dos varões para lajes de betão armado ou pré-esforçado, [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]			
	Espessura da laje [mm] h_s	Distância média ao eixo a		
		Armadas numa só direcção	Armadas nas duas direcções	
			$l_y / l_x \leq 1,5$	$1,5 \leq l_y / l_x \leq 2$
REI 30	60	10*	10*	10*
REI 60	80	20	10*	15*
REI 90	100	30	15*	20
REI 120	120	40	20	25
REI 180	150	55	30	40
REI 240	175	65	40	50

Notas (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;
(0) - l_y e l_x são os vãos da laje ($l_y > l_x$);
(2) - Os valores de a nas lajes armadas nas duas direcções estão relacionados com lajes apoiadas nos quatro bordos. Caso contrário deverá considerar-se laje armada numa só direcção;
- Em lajes armadas em duas direcções, a refere-se à distância da face ao eixo dos varões do nível inferior.

3.3.4.2. Lajes maciças contínuas

No caso de lajes maciças contínuas a coluna para valores de h_s e valores de a da coluna com $l_y / l_x \leq 1,5$ do Quadro 3.14 (colunas cinzentas) é válida para lajes armadas numa ou duas direcções se forem cumpridas as seguintes condições:

- a) Se a redistribuição dos momentos negativos for conhecida e inferior a 15%;
- b) Deve ser garantida para os momentos negativos uma armadura mínima de $A_s \geq 0.005A_c$ e $A_{s,req}(x)$ (3.29) no caso de se verificarem as seguintes condições
 - a. Aço de ductilidade normal;
 - b. Em lajes contínuas de dois vãos, se os extremos tiverem livre rotação;
 - c. Não haver possibilidade de redistribuir os efeitos do esforço transversal na direcção do vão (por exemplo, por não haver paredes de suporte nessa direcção).

No caso de alguma destas condições não ser verificada a laje deverá ser tratada como laje maciça simplesmente apoiada.

3.3.4.3. Lajes fungiformes

A classe de resistência ao fogo das lajes fungiformes vem definida no Quadro 3.15. Estas classes dependem da espessura h_s da laje e da distância do eixo das armaduras à face aquecida, a .

Caso a redistribuição dos momentos negativos for desconhecido ou superior a 15% o valor da distância média ao eixo da armadura, a , deve ser considerado como uma laje maciça simplesmente apoiada com armadura numa direcção (Quadro 3.15).

Para resistências maiores ou iguais a REI 90, pelo menos 20% da armadura superior em cada direcção entre apoios intermédios exigível pelo Eurocódigo 2, parte 1-1, [9], deverá manter-se na totalidade do vão, sendo amarrada no pilar.

Quadro 3.15 - Dimensões mínimas da espessura de lajes fungiformes e da distância da face ao eixo dos varões para lajes de betão armado ou pré-esforçado, [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]	
	Espessura da laje [mm] h_s	Distância média ao eixo a
REI 30	150	10*
REI 60	180	15*
REI 90	200	25
REI 120	200	35
REI 180	200	45
REI 240	200	50

Notas (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente.

3.3.4.4. Lajes nervuradas

No caso das lajes nervuradas, se forem armadas apenas numa direcção, deverão ser consideradas como lajes maciças onde as nervuras são consideradas vigas.

O Quadro 3.16 referente do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], apresenta os parâmetros geométricos de verificação da resistência ao fogo das lajes nervuradas, armadas ou pré-esforçadas em duas direcções. As classes de resistência ao fogo são dependentes da largura da nervura b_{min} , da distância do eixo das armaduras à face aquecida da nervura, da altura h_s da lajeta de compressão e da distância do eixo das armaduras de compressão à face aquecida.

O Quadro 3.16a) é válido para vigas simplesmente apoiadas, e vigas com REI inferior a 180 onde se verifique a expressão (3.29). O Quadro 3.16b) é aplicável a vigas contínuas com pelo menos um lado encastrado.

Quadro 3.16 - Dimensões mínimas e da distância da face ao eixo do varão de lajes nervuradas armadas em duas direcções: a) simplesmente apoiadas; b) com pelo menos um lado encastrado, [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]			
	Espessura da laje h_s e distância de a no vão	Possíveis combinações da largura das nervuras b_{\min} e a distância ao eixo das armaduras a		
REI 30	$h_s = 80$ $a = 10^*$	$b_{\min} \geq 80$ $a = 15^*$		
REI 60	$h_s = 80$ $a = 10^*$	$b_{\min} = 100$ $a = 35$	$b_{\min} = 120$ $a = 25$	$b_{\min} \geq 200$ $a = 15^*$
REI 90	$h_s = 100$ $a = 15^*$	$b_{\min} = 120$ $a = 45$	$b_{\min} = 160$ $a = 40$	$b_{\min} \geq 250$ $a = 30$
REI 120	$h_s = 120$ $a = 20$	$b_{\min} = 160$ $a = 60$	$b_{\min} = 190$ $a = 55$	$b_{\min} \geq 300$ $a = 40$
REI 180	$h_s = 150$ $a = 30$	$b_{\min} \geq 220$ $a = 75$	$b_{\min} = 260$ $a = 70$	$b_{\min} \geq 410$ $a = 60$
REI 240	$h_s = 175$ $a = 40$	$b_{\min} = 280$ $a = 90$		$b_{\min} \geq 500$ $a = 70$

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]			
	Espessura da laje h_s e distância de a no vão	Possíveis combinações da largura das nervuras b_{\min} e a distância ao eixo das armaduras a		
REI 30	$h_s = 80$ $a = 10^*$	$b_{\min} \geq 80$ $a = 10^*$		
REI 60	$h_s = 80$ $a = 10^*$	$b_{\min} = 100$ $a = 25$	$b_{\min} = 120$ $a = 15^*$	$b_{\min} \geq 200$ $a = 10^*$
REI 90	$h_s = 100$ $a = 15^*$	$b_{\min} = 120$ $a = 35$	$b_{\min} = 160$ $a = 25$	$b_{\min} \geq 250$ $a = 15^*$
REI 120	$h_s = 120$ $a = 20$	$b_{\min} = 160$ $a = 45$	$b_{\min} = 190$ $a = 40$	$b_{\min} \geq 300$ $a = 30$
REI 180	$h_s = 150$ $a = 30$	$b_{\min} \geq 310$ $a = 60$	$b_{\min} = 600$ $a = 50$	
REI 240	$h_s = 175$ $a = 40$	$b_{\min} = 450$ $a = 70$	$b_{\min} = 700$ $a = 60$	

a)

$$a_{sd} = a + 10$$

Notas (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;

(1) - a_{sd} representa a distância medida entre o eixo da armadura e a superfície lateral da nervura exposta ao incêndio.

b)

3.4. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO

Os métodos simplificados de cálculo são utilizados para calcular a capacidade de carga dos elementos aquecidos e em comparação com os esforços obtidos, para a situação de incêndio, permitem verificar a segurança dos elementos estruturais. Estes métodos são descritos pelo Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], no Anexo B.

O Anexo B fornece dois métodos simplificados de cálculo, designados de Método da Isotérmica de 500°C e Método das Zonas para elementos sujeitos a esforços axiais e momentos flectores. O segundo método deverá ser apenas utilizado para a curva de incêndio ISO 834, enquanto que o primeiro poderá também ser utilizado com curvas de incêndio paramétricas;

No anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1] são apresentados perfis de temperatura, para inúmeras secções e inúmeros tempos de exposição ao incêndio ISO 834, que podem ser usados para a aplicação dos métodos simplificados.

O Método da Isotérmica de 500°C baseia-se no pressuposto que o betão a cima dos 500°C perde a totalidade da sua resistência enquanto se considera que o restante betão se encontra à temperatura ambiente. O método das Zonas considera a redução da secção baseando-se na distribuição da resistência e rigidez, dependente do campo de temperaturas em várias zonas numa parede equivalente ao elemento em análise, seguindo-se um determinado procedimento de cálculo.

Em ambos os métodos simplificados considera-se que o aço irá sofrer uma redução da sua capacidade resistente em função da temperatura, como indicado na secção 3.2.3 do presente capítulo.

Os resultados dos dois métodos apresentados irão ser conservativos, mas por serem de fácil aplicação, menos conservativos e mais abrangentes que os métodos tabelados, o seu uso é mais aconselhado.

Ambos os métodos simplificados de cálculo são aplicáveis a secções de betão armado e pré-esforçadas sujeitas a esforços axiais, momentos flectores e qualquer combinação daqueles esforços.

As seguintes hipóteses simplificativas são consideradas em ambos os métodos:

- As tensões de corte e torção não são consideradas no cálculo;
- Não é considerado qualquer gradiente de temperatura ao longo do comprimento dos membros estruturais;
- Não foi considerado o fenómeno de “Spalling”.

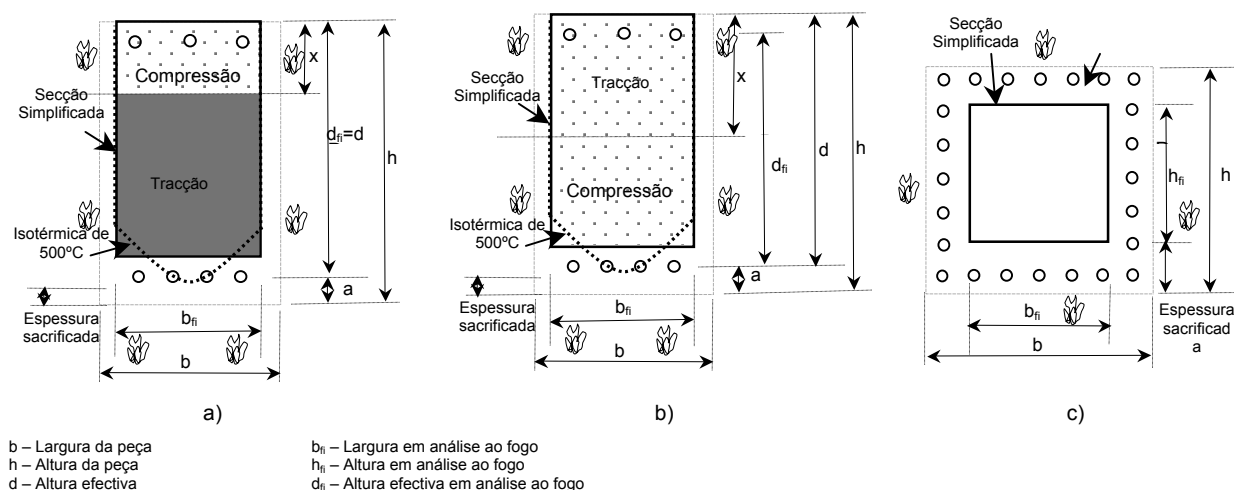
3.4.1. Método da Isotérmica de 500°C

Este método aplica-se à exposição do incêndio ISO 834 ou qualquer outro regime de aquecimento com campos de temperatura similares como a exposição a incêndios paramétricos. Este método é válido apenas para valores mínimos de largura da secção dados no Quadro 3.17 para exposição ao incêndio padrão ISO 834 e para exposição a incêndios paramétricos, para um factor de abertura $O \geq 0,14m^{1/2}$ (Anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]), e cargas de incêndios, também especificados no Quadro 3.17.

Quadro 3.17 - Largura mínima da secção em função da resistência ao fogo e da densidade de carga de incêndio, para o incêndio padrão e curvas paramétricas, respectivamente.

Resistência ao fogo	R60	R90	R120	R180	R240
Largura mínima (mm)	90	120	160	200	280
Carga de incêndio (MJ/m ²)	200	300	400	600	800
Largura mínima (mm)	100	140	160	200	240

Na Figura 3.10 são apresentados três exemplos de como deve ser feita a redução pela isotérmica de 500°C:



3.4.2. MÉTODO DAS ZONAS

O Método das Zonas só é aplicável ao incêndio padrão ISO 834, sendo um método mais trabalhoso de encontrar a secção reduzida mas que ao mesmo tempo se torna mais rigoroso. Aspecto este que se pretende avaliar neste trabalho quando se utilizarem estes métodos para verificação dos elementos estruturais de um projecto

A secção é assumida como uma “parede equivalente”, ver Figura 3.11 g), tomando o valor da largura da secção, b , (altura, h , no caso de lajes) o valor de W ou $2W$ conforme esteja exposta ao fogo numa face ou nas duas, respectivamente.

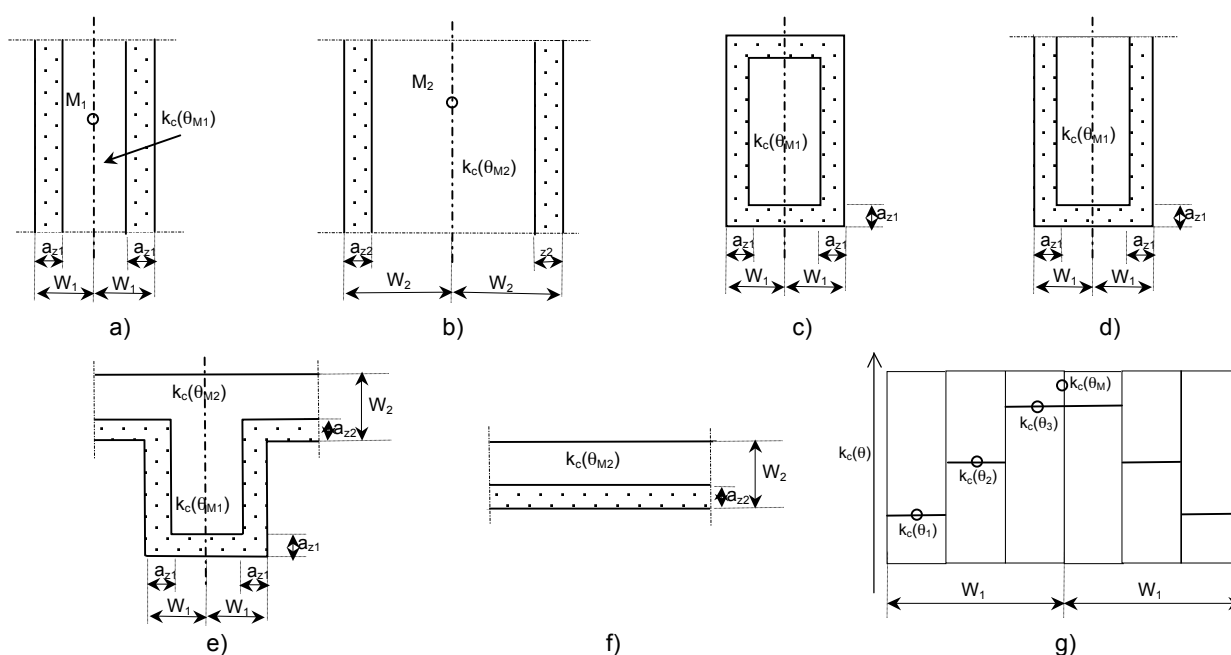


Fig. 3.11 - Definição da variável az e W – Redução da resistência e da secção para peças sujeitas a incêndio: a) Parede; b) Parede espessa; c) Pilar; d) Extremo da parede; e) Viga; f) Laje; g) “Parede equivalente”, divisão da parede exposta ao incêndio em ambas as faces em zonas para o cálculo de redução da resistência e az , [4].

Para as partes inferiores extremas dos elementos rectangulares expostos ao fogo, em que a largura é inferior à altura, o valor de az é assumido como igual ao valor calculado para os lados, (extremo da parede, pilar e viga).

O valor de az , é calculado da forma seguinte:

- Metade da espessura da parede é dividida em n zonas paralelas de igual espessura (m) em que $n \geq 3$ (Figura 3.11g);
- A temperatura é calculada para o centro de gravidade de cada zona (Anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]);
- As reduções correspondentes das resistências à compressão do betão de cada zona, $k_c(\theta_i)$, são determinadas (Quadro 3.3);
- O ponto M é o centro de gravidade resistente da “parede equivalente”. O coeficiente de redução médio o qual permite ter em conta a influência da temperatura dentro de cada

zona, é calculado através da expressão (3.30), em que n é o número de zonas paralelas na largura W , em que W é metade da largura da secção:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (3.30)$$

- A largura da zona afectada para as vigas e lajes é calculada com a expressão (3.31);

$$a_z = w \cdot \left(1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right) \quad (3.31)$$

- Para paredes e pilares, em que o efeito de segunda ordem tem que ser considerado usa-se a expressão (3.32) ou através das Figuras B.5b e B.5c do Anexo B do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

$$a_z = w \cdot \left(1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right) \quad (3.32)$$

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade da secção reduzida são assumidos como constantes e iguais aos calculados para o ponto M.

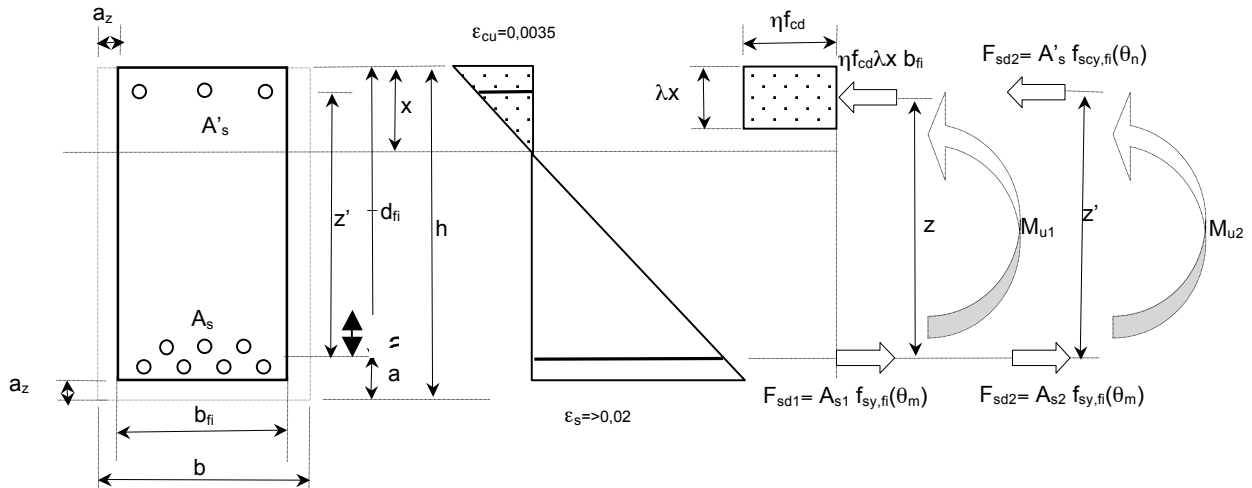
3.4.3. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

3.4.3.1. Procedimento de cálculo da capacidade resistente de uma secção de betão armado exposta ao esforço axial e ao momento flector

O procedimento de cálculo para determinar a capacidade resistente de uma secção de betão armado sujeito a flexão simples e flexão composta em situação de incêndio é comum para ambos os métodos:

1. Determinação do campo de temperaturas na secção da peça para um determinado instante de tempo e para uma determinada exposição ao fogo;
2. Redução da secção de betão - Determinação de b_{fi} , h_{fi} e d_{fi} ;
3. Determinação da temperatura nas armaduras nas zonas de tracção e/ou compressão;
4. Redução da resistência da armadura devido à temperatura;
5. Utilização de um método de cálculo à temperatura ambiente para a realização do cálculo da capacidade resistente da secção (do momento flector e esforço axial últimos) com as propriedades mecânicas reduzidas pelo efeito da temperatura do incêndio;
6. Comparação daquele valor com o valor do momento actuante devido à acção de projecto.

O passo 5 referido anteriormente será agora explanado suportando-se na análise da Figura 3.12. Apresenta-se na Figura 3.12 os parâmetros geométricos que têm que ser definidos quando se calcula o momento flector resistente das vigas. A figura mostra também a forma como se processa o cálculo da capacidade de carga de uma secção em situação de incêndio na sua situação mais geral, isto é com armadura de tracção e compressão.



- x - Profundidade do eixo neutro
- b - Largura original da peça
- h - Altura original da peça
- b_{fi} - Largura efectiva da secção reduzida
- h_{fi} - Altura da secção reduzida
- d_{fi} - Altura efectiva da secção reduzida
- z - braço do momento relativo à zona em compressão de betão e tracção das armaduras
- z' - braço do momento relativo às armaduras em tracção e compressão
- A_s - $A_s = A_{s1} + A_{s2}$ - Área de armadura em tracção
- A_{s1} - Área de armadura em tracção que se encontra em equilíbrio com a zona em compressão do betão
- A_{s2} - Área de armadura em tracção que se encontra em equilíbrio com a armadura em compressão
- A'_s - Área de armadura em compressão
- $f_{cd,fi}(20)$ - Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão à temperatura ambiente ($= f_{ck} / \gamma_{c,fi}$)
- $f_{sd,fi}(\theta_m)$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço em situação de incêndio à temperatura média do nível das armaduras
- $f_{sdc,fi}(\theta_m)$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à compressão do aço em situação de incêndio à temperatura média do nível das armaduras
- w_k - Percentagem mecânica de armadura da secção reduzida
- θ_m - Temperatura das armaduras de compressão ou tracção para um determinado instante. O cálculo é feito à custa da temperatura média dos varões
- f_{ck} - Valor característico da resistência da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade, determinado em provetes prismáticos
- λ, η - Parâmetros que definem a altura efectiva da zona de betão em compressão e a resistência efectiva do betão

$$\lambda = 0,8 \quad \eta = 1 \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \quad 50 \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$$

$$\eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200$$

Nota 1: - O valor das temperaturas para os valores das tensões $f_{sd,fi}(\theta)$ e $f_{sdc,fi}(\theta)$ são naturalmente distintos.

Fig. 3.12 - Distribuição de tensões e extensões no estado limite último para uma secção rectangular de betão armado reduzida com armadura de tracção e compressão.

O momento flector resistente da secção reduzida é calculado através da seguinte expressão:

$$M_u = M_{u1} + M_{u2} \quad (3.33)$$

Com:

$$M_{u1} = A_{s1} \cdot f_{sd,fi}(\theta_m) \cdot d_{fi} \cdot \left(1 - \frac{w_k}{2}\right) \quad (3.34)$$

$$M_{u2} = A_{s2} \cdot f_{sd,fi}(\theta_m) \cdot z \quad (3.35)$$

$$w_k = \frac{A_{s1} \cdot f_{sd,fi}(\theta_m)}{b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot f_{cd,fi}(20)} \quad (3.36)$$

3.4.3.2. Procedimento de cálculo de métodos simplificados para determinar a capacidade resistente de uma secção de betão armado com flexão composta desviada

Ao longo do trabalho desenvolvido chegou-se à conclusão que não existia nenhum procedimento de cálculo definido para a resolução, pelos métodos simplificados, de elementos expostos à flexão composta desviada na situação de incêndio. No caso de pilares sujeitos a estes esforços, à temperatura ambiente, a resolução mais comum é o uso de ábacos, definidos para um número restrito de situações, mas que para o caso de elementos sujeitos ao fogo não podem ser usados. Podem ser também feitos cálculos, mas que pelo seu grau de complexidade perdem interesse.

Pelos motivos enunciados chegou-se á conclusão que, para se poder recorrer aos métodos simplificados em elementos sujeitos ao incêndio e a combinação de acções, a melhor solução seria utilizar e adaptar um método de cálculo simplificado dos elementos em flexão composta desviada para a temperatura ambiente. A proposta do autor desta dissertação passou por estudar os métodos simplificados, à temperatura ambiente, e adaptá-los de maneira a se poder proceder à redução das secções resistentes e ao efeito da temperatura nos aços de forma a determinar a resistência ao fogo.

São apresentado por Lima e Mum[11] três métodos simplificados de cálculo dos esforços resistentes de secções em flexão composta desviada, baseados na consideração em separado da flexão composta segundo cada um dos eixos principais de inércia:

1. O primeiro método sugerido pelo REBAP[12], traduz-se pela seguinte expressão:

$$\left(\frac{M_{Rd,x}}{M_{Rd,x0}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{Rd,y}}{M_{Rd,y0}}\right)^\alpha = 1 \quad (3.37)$$

- $M_{Rd,x}$ - Momento resistente em x, em flexão desviada composta com um esforço normal N_{rd}
- $M_{Rd,x0}$ - Momento resistente em x, em flexão composta com um esforço normal N_{rd}
- $M_{Rd,y}$ - Momento resistente em y, em flexão desviada composta com um esforço normal N_{rd}
- $M_{Rd,y0}$ - Momento resistente em y, em flexão composta com um esforço normal N_{rd}
- α - Expoente que dependes da forma da secção, percentagem de armadura, e valor de N_{rd} . Em armaduras iguais nas 4 faces $\alpha=1.2$, em qualquer dos casos $\alpha=1$ estará do lado da segurança

- e'_y - Excentricidade fictícia
 e_y - Excentricidade na direcção y segundo (3.39)
 β - coeficiente que depende do esforço normal reduzido, v , Quadro 3.18
 e_x - Excentricidade na direcção x segundo (3.39)
 h e b - Dimensões da secção segundo sistema de eixos de forma a $e_y/e_x \geq h/b$

Quadro 3.18 – Valores do coeficiente β para determinação da excentricidade fictícia

$v = N_{sd} / b \cdot h \cdot f_{cd}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	$\geq 1,2$
β	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4

O procedimento de cálculo para determinar a capacidade resistente de uma secção de betão armado sujeito a flexão composta desviada em situação de incêndio será idêntica à considerada na flexão composta (3.4.3.1) mas onde se aplica um dos três métodos descritos para cálculo de flexão composta desviada no ponto 5.

3.4.3.3. Extensão no aço

O procedimento normal quando se projecta uma viga de betão é o de assumir que é normalmente armada (a extensão do aço ultrapassa o valor de 2%). Compreende-se então a adopção, no cálculo de M_u , do valor de $f_{sd,fi(\theta)}$ que prescinde da consideração da interacção simultânea da temperatura com a extensão (em vez de $f_{sd,fi(\theta,\epsilon)}$). Esta simplificação representa que a avaliação do momento resistente prescinde da consideração da interacção simultânea da temperatura e da extensão. O procedimento de cálculo é assim simplificado mas deverá fazer-se a verificação se a extensão do aço ultrapassa o valor de 2%. Verificação que pode ser realizada com a expressão seguinte na qual se considera a extensão para o betão igual a 0,0035 (correspondente à tensão de compressão última do betão).

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} \frac{(d_{fi} - x)}{x} \quad (3.41)$$

De facto, realizações experimentais e cálculos complementares mostraram que, se as armaduras de tracção são a causa de colapso então, a tensão de cedência corresponde a pelo menos uma extensão de 0,5% ultrapassando os 2%. Os cálculos efectuados admitem o valor de 2% para as armaduras de tracção.

3.4.3.4. Posicionamento das armaduras

A determinação da altura da secção reduzida para secções com mais do que uma camada de varões, e estes eventualmente com diâmetros diferentes, requer o cálculo da distância a , distância entre o centro das armaduras e a face aquecida da secção reduzida, como se esquematiza na Figura 3.14.

A determinação da altura útil da secção reduzida, d_{fi} , requer o cálculo da posição do centro de gravidade das armaduras, a . Refira-se que, para o Caso I, seguindo a metodologia actual do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], o cálculo de a fica aquém do correcto na medida em que cada nível de armaduras pode ter diferentes áreas de aço. O cálculo é de qualquer forma conservativo porque na maioria das vezes, a colocação de maior quantidade de armadura faz-se no nível inferior das várias camadas.

	CASO I	CASO II
Distribuição geométrica das armaduras		
Redução média da resistência do nível de armadura em relação ao acréscimo de temperatura	$k_v(\theta) = \frac{\sum k_s(\theta_i)}{n_v} \quad (3.42)$	
Resistência média do grupo de armadura em relação ao acréscimo de temperatura		$k(\varphi) \cdot f_{sd,fi} = \frac{\sum [k_s(\theta_i) \cdot f_{sd,i} \cdot A_i]}{\sum A_i} \quad (3.44)$
Distância a , desde o bordo inferior da secção reduzida até ao centro de gravidade das armaduras	$a = \frac{\sum a_v \cdot k_v(\theta)}{\sum k_v(\theta)} \quad (3.43)$ (1)	$a = \frac{\sum a_i \cdot k_s(\theta_i) \cdot f_{sd,i} \cdot A_i}{\sum k_s(\theta_i) \cdot f_{sd,i} \cdot A_i} \quad (3.45)$
<p> θ_i - Temperatura na armadura i $K(\theta_i)$ - Redução da resistência da armadura i devido à temperatura θ_i. $K_v(\theta)$ - Redução média da resistência do nível da armadura v n_v - Número de armaduras no nível v $f_{sd,i}$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras ordinárias à temperatura ordinária. $f_{sd,fi}$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras em situação de incêndio $k(\varphi) \cdot f_{sd,fi}$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do grupo das armaduras em situação de incêndio a - Distância entre as armaduras e o bordo inferior da secção recta reduzida a_v - Distância entre a camada v de varões e o bordo inferior da secção recta reduzida a_i - Distância desde o bordo inferior da secção reduzida à armadura i A_i - Área da secção da armadura i </p> <p> Nota: (1) Para apenas dois níveis de armadura o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], admite a utilização de outra expressão: $a = \sqrt{a_1 \cdot a_2} \quad (3.46)$ </p> <p> Note-se que este cálculo fica aquém do correcto na medida em que cada nível pode ter diferentes áreas de armadura. De qualquer forma, é conservativo porque na maioria das vezes, a colocação de maior quantidade de armadura faz-se no nível inferior. Refira-se que em versões anteriores do Eurocódigo o procedimento contemplava a área de armadura. </p>		

Fig. 3.14 - Cálculo da distância entre o centro das armaduras e a face sujeita a incêndio, a .

4

ORGANIGRAMA E EXPLICAÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO – MÉTODOS TABELADOS E SIMPLIFICADOS

4.1. INTRODUÇÃO

Em Portugal a regulamentação obriga a que se faça um dimensionamento das estruturas seguindo o regime jurídico e o regulamento técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, RJ-SCIE, [5], e RT-SCIE, [6]. Nestes regulamentos são apresentadas as disposições técnicas e específicas a cumprir para se verificar a segurança contra incêndios em edifícios, é em particular referindo num dos pontos a necessidade de verificação da resistência estrutural em escalões de tempo, como se viu no Quadro 2.3 do Capítulo 2.

O RJ-SCIE exige que se faça a verificação estrutural mas não indica como nem indica normas ou métodos a utilizar, sendo este um dos motivos, a ter sido muitas vezes negligenciada em Portugal. Em Maio de 2010 é lançado o primeiro Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], em versão Portuguesa com o Anexo Nacional, que vem criar a primeira regulamentação do tipo no nosso País, apesar da versão Inglesa estar disponível há anos.

Nos novos Eurocódigos são indicados os métodos analisados no capítulo anterior, que embora não tenham um grau de complexidade muito elevado, são métodos em que a sua aplicação numa estrutura completa se torna num processo muito moroso.

Os Métodos Tabelados por serem métodos de consulta de tabelas deveriam demorar menos tempo na sua aplicação mas por terem algumas regras de aplicação e por vezes requererem algumas interpolações, podendo chegar a 16 no caso de pilares, tornam-se na mesma demorados, além de serem métodos bastante conservativos. Os Métodos Tabelados podem ainda obrigar a modificar certos elementos estruturais do projecto para verificação da segurança ao fogo, podendo por vezes ser necessário recorrer-se aos métodos simplificados ou em último caso aos avançados, para verificar a segurança ao fogo.

Os Métodos Simplificados são menos conservativos que os Métodos Tabelados, mas a quantidade de dados necessários e o grau de complexidade de cálculo e de tempo necessário são muito mais elevados que aqueles.

Por outro lado, visto a regulamentação ser bastante recente, em que apenas um grupo muito pequeno de projectistas a conhece ou domina, torna o processo de aplicação desta regulamentação ainda mais moroso e difícil pelos restantes projectistas de estruturas.

Por estes motivos, é bastante vantajoso do ponto de vista prático dispor de uma ferramenta de cálculo automático, para o cálculo de secções sobre o efeito do fogo. Assim, não é absolutamente necessário ter um conhecimento tão aprofundado das novas normas por parte do utilizador daquela ferramenta informática já que ela contempla todas as particularidades e verificações complementares do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]. Ao mesmo tempo este modelo numérico traz grandes vantagens do ponto de vista de tempo gasto na sua aplicação.

Durante esta dissertação foi então desenvolvida uma ferramenta que faz a aplicação dos Métodos Tabelados e Simplificados do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], inserido no programa de cálculo estrutural ao fogo, **SiFiRe**, da autoria do Professor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues Gonçalves.

No seguimento deste Capítulo irá ser explicado o processo de desenvolvimento e o modo de utilização das várias funcionalidades do programa.

4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

4.2.1. LINGUAGEM

Os objectivos principais do programa, além de permitirem o cálculo estrutural segundo os métodos indicados, são os de tornar-se acessível a um número máximo de utilizadores e ser de fácil utilização. Para isso é essencial que o programa seja acessível através da internet e com um visual o mais intuitivo possível. Por esse motivo o interface gráfico do programa foi desenvolvido em conjunto com o aluno de Mestrado Integrado em Engenharia Informática e Computação da FEUP, Mário João Teixeira Carneiro.

O interface foi desenvolvido em linguagem HTML e JavaScript, por opção do programador, e por permitir uma boa e rápida ligação entre interface e programas, permitir as funcionalidades pretendidas e por ser uma linguagem bastante utilizada permitindo uma futura continuidade de desenvolvimento do programa, SiFiRe.

No desenvolvimento dos programas de Cálculo realizados pelo autor foi utilizada a linguagem de programação de alto nível Python, pois permite ter uma velocidade de cálculo bastante boa para o nível de complexidade dos algoritmos desenvolvidos.

Para a utilização do programa basta então ter um computador com ligação à internet e através de um Browser utilizar o programa.

4.2.2. ESTRUTURA GERAL E FUNCIONALIDADES

O programa com o nome de SiFiRe - Verificação da Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão, consiste, até à data da apresentação desta dissertação, num conjunto de 50 programas separados em 3 Métodos:

- Métodos Tabelados;
- Métodos Simplificados das Zonas;
- Métodos Simplificados da Isotérmica de 500°C.

Sendo que cada um destes Métodos foi dividido em sub-métodos em função da regulamentação, tipos de elementos e ou secções como se pode ver no Organigrama demonstrado na Figura 4.1.

Embora os Métodos Tabelados sejam bastante mais conservativos que os Simplificados, optou-se por se incluir os dois, pois no caso dos primeiros os *inputs* necessários são menores e mais fáceis de obter,

e em caso da não verificação dos elementos estruturais à segurança ao fogo poderá fazer-se o cálculo pelos Métodos simplificados. Ter os dois métodos disponíveis, sendo que nos métodos simplificados ainda pode optar entre o método da isotérmica de 500°C e o método das Zonas, permite então que o utilizador tenha mais opções e que possa fazer uma análise comparativa entre métodos.

Todos os programas são baseados no princípio *input* e *output*, sendo que em todos estes o resultado irá ser “OK”, “KO” ou “Não aplicável” sendo também apresentados os valores que justifiquem o resultado que se distinguem de método para método.

Nos métodos tabelados há ainda a possibilidade de se fazer dois cálculos complementares de resultado:

- Verificação dos recobrimentos exigidos à temperatura ambiente Eurocódigo 2, parte 1-1, [9];
- ‘Melhoramento’ do resultado segundo a secção 3.2 e expressão (3.10) do Capítulo anterior, para os elementos, vigas e lajes, sujeitos a flexão e temperaturas dos varões de aço diferentes da temperatura crítica de 500°.

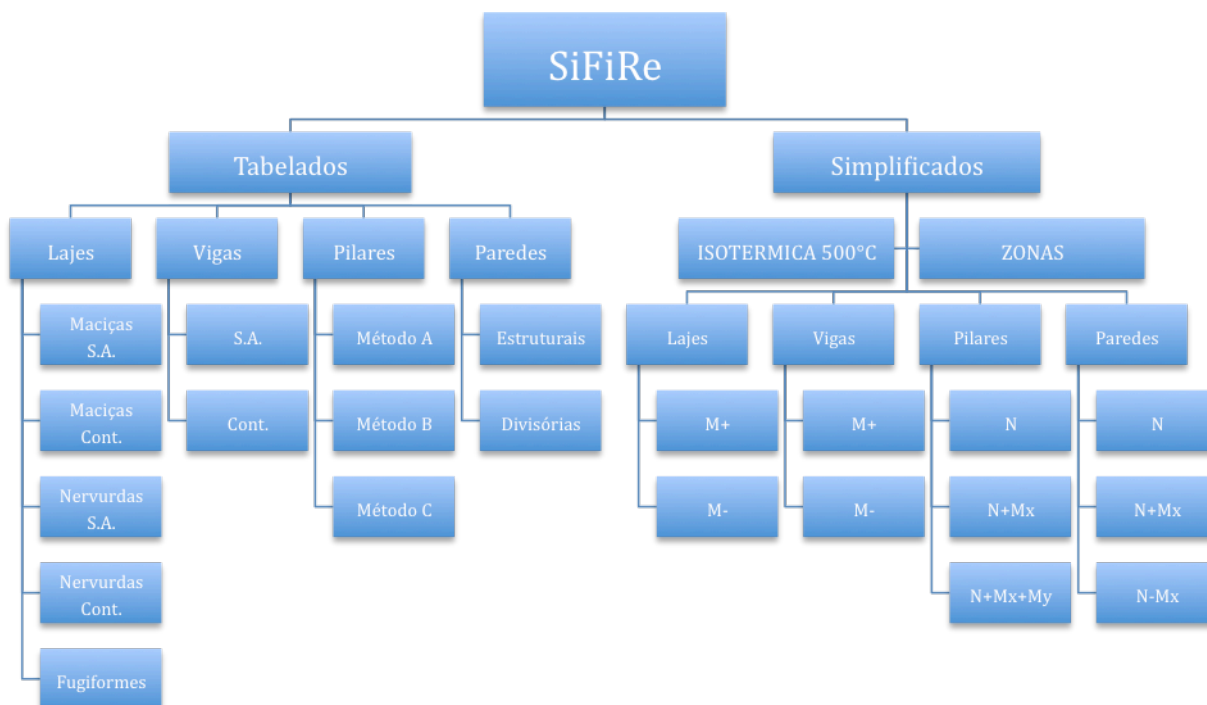


Fig. 4.1 – Organograma representativo dos Métodos e sub-métodos de cálculo .

Em todas as páginas do programa existe também uma ajuda rápida que contém informações sobre o tipo de método a escolher assim como algumas informações sobre os *inputs* a introduzir nas opções dos utilizadores, e a possibilidade de consultar o manual de utilizador do programa que fornece explicações mais pormenorizadas sobre os métodos utilizados, cálculo de alguns *inputs* e os perfis de temperatura que devem ser usados para os Métodos Simplificados.

Foi ainda criada a função exportar, presente em todos os métodos, que irá imprimir para formato Pdf os *inputs* e os resultados obtidos para que os utilizadores possam usar este documento como comprovativo da verificação efectuada. Espera-se que futuramente esta opção possa também imprimir cálculos e resultados intermédios, fazendo a memória descritiva completa do cálculo.

No seguimento deste Capítulo será então explicado o modo de utilização das funcionalidades e da Verificação/Cálculo de cada método.

4.3. FUNCIONAMENTO

4.3.1 MENU PRINCIPAL

O Menu Principal, como demonstrado na Figura 4.2, faz ligação para todos os programas sendo que sempre que durante o funcionamento do programa se queira mudar de método tem que se voltar a esta página (botão “Início” na barra superior).



Fig. 4.2 – Menu principal do Programa SiFiRe.

Como se pode verificar na imagem existe uma barra superior preta, esta barra acompanha todas as páginas do programa, e nelas estão incluídas as seguintes funcionalidades:

- Exportar – Para se exportar para pdf o resultados obtidos (excepto página principal);
- Ajuda – Abre uma ajuda rápida;
- Manual de Utilizador – Abre um ficheiro com o Manual de Utilizador;
- Início – Botão que faz o regressar à Página do Menu Principal.

No menu de ajuda desta página é feita uma explicação rápida geral dos Métodos tabelados e Simplificados (Zonas e Isotérmica de 500°C) para um rápido entendimento do utilizador da opção de escolha a ter.

Nesta primeira página do SiFiRe pode-se ainda verificar a existência das opções dos Métodos Simplificados SinFirb e SinFire, [4], mas que ainda está em desenvolvimento não sendo possível a sua utilização e não fazendo parte do estudo desta tese.

4.3.2 MÉTODOS TABELADOS

Em todos os métodos tabelados apresentados, irá existir uma verificação da distância do eixo da armadura à face sujeita a incêndio, a , e os valores da base das secções, b , como demonstrados na Figura 3.6. Para a aplicação do programa, o utilizador apenas deverá ter em atenção para usar sempre os valores para o caso mais extremo (valor de a mais reduzido) no caso de mais do que um tipo de varão.

Em todos os casos, excepto para Paredes Divisórias, estes métodos verificam a estabilidade estrutural R (ver secção 2.2), e verifica EI no caso de lajes e paredes.

Para betão leve ou para agregados calcários, os valores obtidos nas tabelas (valores que nos resultados aparecem como mínimos) deverão ser reduzidos de 10% , para vigas e lajes apenas, sendo necessária a comparação dos resultados apresentados.

As disposições construtivas e verificações de aplicabilidade, demonstradas no capítulo anterior, são verificadas pelo programa; em caso de incumprimento de alguma destas irá sair uma mensagem de aviso em função do que não cumpriu.

Em todos os Métodos Tabelados a apresentação de resultados irá ser feita como se exemplifica na Figura 4.3, onde todos os valores são dados em milímetros:

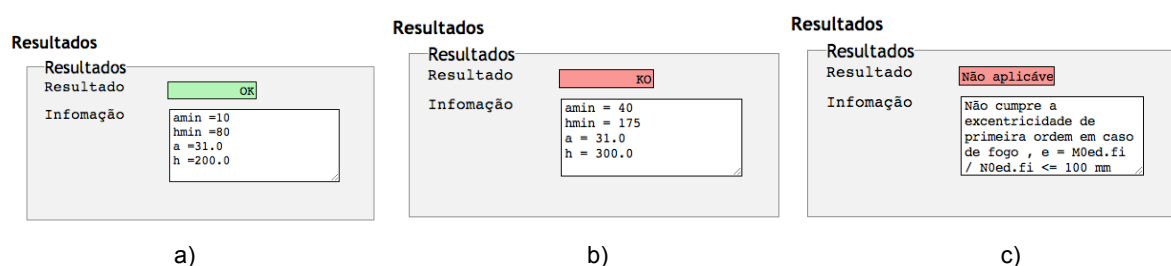


Fig. 4.3 – Exemplo de apresentação de resultados para os Métodos Tabelados; a) OK; b) KO; c) Não aplicável.

4.3.2.1 Lajes

O programa apresenta três tipos de lajes, e em todos os casos considera-se que apenas a face inferior está exposta ao fogo. Os tipos de laje são:

1. Lajes Maciças – Este método aplica as regras respectivas do capítulo anterior aplicando o Quadro 3.14 para lajes maciças simplesmente apoiadas e contínuas armadas numa ou duas direcções, sendo que em termos de *inputs* a única diferença é a redistribuição no caso das contínuas. Na figura seguinte é apresentada a página de inputs:

Lajes Maciças contínuas Método das Tabelas

Fig. 4.4 – Exemplo da página de Lajes Maciças.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;
 h_1 – Altura efectiva da laje de betão calculada no dimensionamento;
 rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
 l_x – largura da laje na direcção X;
 l_y – largura da laje na direcção Y;
 \varnothing varões – diâmetro da armadura e estribos;
 Redistribuição (δ) – Redistribuição feita no dimensionamento segundo Eurocódigo 2, parte 1-1, [9].

2. Lajes Nervuradas – Este método aplica as regras respectivas do capítulo anterior aplicando os Quadros 3.14, 3.13 e 3.11 para lajes nervuradas com armadura numa direcção e os Quadros 3.16a) e b) com armadura nas duas direcções. Há também a distinção entre lajes simplesmente apoiadas e contínuas sendo que em termos de *inputs* a única diferença é a redistribuição no caso das contínuas. Na figura seguinte é apresentada a página de *inputs*:

Lajes Nervuradas contínuas

Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo
 Tempo min

Geometria
 b m
 h_1 m
 rec mm

Armadura de Tracção da Laje
 \varnothing_x varões mm

Estribos
 \varnothing mm

Armadura de Tracção das Nervuras
 \varnothing varão mm

Nº Direcções das Armadura
 Nº Vezes armado mm

Redistribuição
 δ %

Fig. 4.5 – Exemplo da página de Lajes Nervuradas.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;
 b – largura das nervuras;
 h_1 – Altura efectiva da laje de betão;
 rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
 \varnothing varões – diâmetro das armaduras e estribos;
 Nº de vezes armada – se for armada nas duas direcções ou não (X e Y);
 Redistribuição (δ) – Redistribuição feita no dimensionamento segundo Eurocódigo 2, parte 1-1, [9].

3. Lajes Fugiformes – Este método aplica as regras respectivas do capítulo anterior aplicando o Quadros 3.15. Caso a redistribuição de momentos da laje seja superior a 15% ou desconhecida o programa irá também usar o Quadro 3.14 de lajes maciças. Na figura seguinte é apresentada a página de *inputs*:

Lajes fugiformes

Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo		Tempo		60 min	
Geometria		h		0.3 m	
		rec		25 mm	
Armadura de tracção		Ø varões		12 mm	
Estribos		Ø varões		8 mm	
Redistribuição		δ		≥ 15 %	

Limpar Calcular

Fig. 4.6 – Exemplo da página de Lajes Fugiformes.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;

h – Altura efectiva da laje de betão;

rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);

Øvarões – diâmetro das armaduras e estribos;

Redistribuição (δ) – Redistribuição feita no dimensionamento segundo Eurocódigo 2, parte1-1, [9].

4.3.2.2 Vigas

Este método aplica as regras respectivas do capítulo anterior aplicando o Quadro 3.13 e 3.11 para Vigas simplesmente apoiadas e contínuas, sendo que em termos de *inputs* a única diferença é a redistribuição no caso das contínuas. Estes métodos só são aplicáveis para vigas expostas até um limite de 3 faces, estando a face superior protegida pela laje, o utilizador pode considerar a quarta face se verificar o demonstrado em 3.3.3.3. Na figura seguinte é apresentada a página de *inputs* para vigas contínuas:

Vigas contínuas

Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo		Tempo		240 min	
Geometria		b		0.6 m	
		rec		35 mm	
Armadura de tracção		Ø varões		30 mm	
Estribos		Ø varões		10 mm	
Redistribuição		δ		? %	

Limpar Calcular

Fig. 4.7 – Exemplo da página para Vigas.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

- Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;
- b – largura da secção;
- rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
- Ø varões – diâmetro das armaduras e estribos;
- Redistribuição (δ) – Redistribuição feita no dimensionamento segundo Eurocódigo 2, parte1-1, [9].

4.3.2.3 Pilares

No caso dos pilares, como demonstrado no capítulo anterior, existem 3 métodos:

- 1- Método A – Este método é recomendado para Pilares sujeitos maioritariamente ao esforço de compressão. O programa faz a verificação dos requisitos para a validade da aplicação do Quadro 3.5. Na figura seguinte é apresentada a página de *inputs*:

Pilares - Método A Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo Tempo <input type="text" value="180"/> min		Armadura n. varões <input type="text" value="2"/> Ø varões <input type="text" value="10"/> mm		Estribos Ø varões <input type="text" value="8"/> mm
Geometria b <input type="text" value="0.3"/> m h <input type="text" value="0.6"/> m l _{0,fi} <input type="text" value="2"/> m rec <input type="text" value="27"/> mm		Acções M _{0ED,fi} <input type="text" value="200"/> KNm N _{0ED,fi} <input type="text" value="1300"/> KN		
Lados expostos ao fogo num. lados <input type="text" value="1"/>		Factor redução μ _{fi} <input type="text" value="0.7"/>		

Fig. 4.8 – Exemplo da página para Pilares pelo Método A.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

- Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;
- b – largura da secção;
- h – altura da secção;
- l_{0,fi} – Comprimento efectivo do pilar em situação de Incêndio;
- rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
- nº varões – número de varões usados na armadura de tracção;
- Ø varões – diâmetro das armaduras e estribos;
- N_{0ED,fi} e M_{0ED,fi} - Forças para Situação de Incêndio (3.7);
- μ_{fi} - Coeficiente de utilização, cálculo segundo Eurocódigo 2, parte1-2, [1], pela expressão (3.22) do presente trabalho, sendo o valor recomendado de 0.7.

- 2- Método B - Este método é recomendado para qualquer tipo de pilar com um valor de esbelteza (λ) inferior a 30. O programa faz a verificação dos requisitos para a validade da aplicação do Quadro 3.6. Na figura seguinte é apresentada a página de *inputs*:

Pilares - Método B

Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo	
Tempo	60 min
Resistências	
Classe Betão	25/30
Tipo de Aço	500
f_{ck}	25000 KPa
f_{yk}	500000 KPa
Geometria	
b	0.3 m
h	0.6 m
rec	25 mm
$l_{0,fi}$	2 m
Armadura	
n. varões	2
Ø varões	12 mm
Estribos	
Ø varões	10 mm
Acções	
$M_{0ED,fi}$	100 KNm
$N_{0ED,fi}$	900 KN
<input type="button" value="Limpar"/> <input type="button" value="Calcular"/>	

Fig. 4.9 – Exemplo da página para Pilares pelo Método B.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;
 Classe de betão – Escolher segundo lista, irá automaticamente dar o valor de f_{ck} ;
 Tipo de Aço – Escolher segundo lista, irá automaticamente dar o valor de f_{yk} ;
 b – largura da secção;
 h – altura da secção;
 rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
 $l_{0,fi}$ – Comprimento efectivo do pilar em situação de Incêndio;
 n° varões – número de varões usados na armadura tracção;
 Ø varões – diâmetro das armaduras e estribos;
 $N_{0ED,fi}$ e $M_{0ED,fi}$ - para situação de incêndio (3.7).

3- Método C - Este método é recomendado para qualquer tipo de pilar com um valor de esbelteza (λ) inferior a 80. O programa faz a verificação dos requisitos para a validade da aplicação dos quadros apresentados no Quadro 3.7 A página dos Método C é idêntica e com os mesmos inputs que a do Método B.

Para o cálculo de $l_{0,fi}$ segundo o Eurocódigo 2, parte1-2, [1], , poderá ser considerado sempre igual ao cálculo de l_0 à temperatura ambiente e deverá proceder para o seu cálculo usando se o Eurocódigo 2, parte1-1, [7], como se demonstra de seguida aplicando as fórmulas (4.1) e (4.2) e a Figura 4.10.

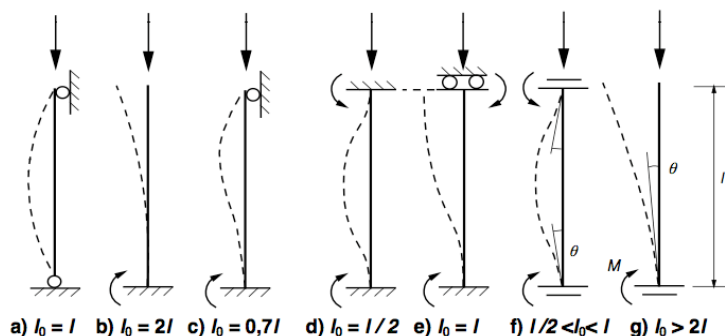


Fig. 4.10 – Exemplos de diferentes comprimentos efectivos (l_0) para elementos Isolados, [9].

Modo de cálculo para elementos contraventados, Figura 4.10 (f), segundo Eurocódigo 2, parte1-1, [9]:

$$l_0 = l \cdot \max \left\{ \sqrt{1 + 10 \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}}; \left(1 + \frac{k_1}{1 + k_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{1 + k_2}\right) \right\} \quad (4.1)$$

Modo de cálculo para elementos contraventados , Figura 4.10 (g), segundo Eurocódigo 2, parte1-1, [9]:

$$l_0 = 0.5l \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{k_1}{0.45 + k_1}\right) + \left(1 + \frac{k_2}{0.45 + k_2}\right)} \quad (4.2)$$

Em que:

l – comprimento real do pilar;

k_1 e k_2 – Flexibilidade relativa do encastramento segundo Eurocódigo 2, parte1-1, [9]:(5.8.3.2);

Nota1: O valor de k para encastramento perfeito será de $k=0$ e o limite de apoio com rotação livre é de $k=\infty$. Deverá considerar se para encastramentos o valor de $k=0.1$ por ser raro o encastramento perfeito;

Nota2: O comprimento efectivo (l_{0fi}) poderá ser considerado $0.5l$ para andares intermédios e $0.5l \leq l_{0fi} \leq 0.7l$ para o andar superior.

4.3.2.4 Paredes

No caso das paredes estas estão divididas em paredes divisórias e paredes como função de suporte sendo que no primeiro caso apenas se verifica EI, ver secção 2.2. O programa irá fazer a verificação pelos Quadro 3.9 e 3.10, respectivamente. Nas figuras seguintes são apresentadas as páginas de *inputs*:

Paredes - Divisórias em Betão (EI) Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo

Tempo min

Geometria

b m

H m

Fig. 4.11 – Exemplo da página para Paredes Divisórias.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;

b – largura da secção;

H – Altura da Parede.

Paredes - Estruturais (REI) Método das Tabelas

Dados

Exigência ao Fogo
REI Tempo 90 min

Geometria
b 0.3 m
rec 25 mm

Armadura de tracção
Ø varões 16 mm

Estribos
Ø varões 10 mm

Factor redução
 μ_{fi} 0.7

Lados expostos ao fogo
n. lados 2

Limpar Calcular

Fig. 4.12 – Exemplo da página para Paredes com função de suporte.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

- Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE[6] para a estrutura;
- b – largura da secção;
- rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
- Ø varões – diâmetro das armaduras e estribos;
- μ_{fi} - Coeficiente de utilização, cálculo segundo Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], pela expressão (3.22) do presente trabalho, sendo o valor recomendado de 0.7.
- Lados Expostos ao fogo – indicar se 1 ou 2 lados estão expostos ao fogo.

4.3.2.5 Cálculos Complementares

Como já foi mencionado anteriormente, segundo o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], para os elementos vigas e lajes sujeitos à flexão e temperaturas dos varões de aço diferentes da temperatura crítica de 500°, deve-se fazer uma alteração do resultado. Através deste programa é então feita uma verificação do resultado calculado anteriormente obtendo-se o novo, a_{min} , e a temperatura crítica a que a armadura de flexão está sujeita, como se pode ver pela figura seguinte:

Vigas Simplesmente apoiadas Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo 90 min

Geometria
b 0.3 m
rec 25 mm

Armadura de tracção
Ø varões 16 mm

Estribos
Ø varões 10 mm

Limpar Calcular

Resultados

Resultados
Resultado OK
Informação
amin = 40
bmin = 300
a = 43.0
b = 300.0

Verificar Recobrimento Melhorar Resultado

Melhoramento do Resultado

Dados
amin 40 mm
M_{rd} 100 KNm
l 3 m
l_{inf} 1 m
Carga variável: q_k Cat B: (3KN/m)
Coeficiente frequente: Cat D: Comerc
 $\Psi_{1,1}$

Limpar Calcular Cancelar

Resultados do Melhoramento

Resultados
Resultado OK
Informação
novo amin=41.319444444
nova temp = 486.805555556

Fig. 4.13 – Exemplo do programa de Melhoramento de resultado.

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

- a_{min} – valor calculado anteriormente, este valor vai ser preenchido automaticamente;
- M_{rd} – Momento resistente à temperatura ambiente;
- l – Comprimento do elemento;
- l_{inf} – largura de influência das cargas aplicadas no elemento;
- q_k – Carga variável segundo o Eurocódigo 1, parte 1-1, [7];
- $\psi_{1,1}$ – Coeficiente combinação frequente segundo Eurocódigo 0, [10].

Pode ainda fazer-se uma verificação do recobrimento mínimo exigido pelo Eurocódigo 2, parte 1-1, [9], como demonstra a figura seguinte:

Paredes - Estruturais (REI) Método das Tabelas

Fig. 4.14 – Exemplo do programa de Verificação de recobrimento segundo o Eurocódigo 2, parte 1-1, [9].

Em que os parâmetros de introdução de dados são:

- a_{min} – valor calculado anteriormente, este valor vai ser preenchido automaticamente;
- n° varões – número de varões usados na armadura tracção;
- Classe estrutural – Deverá ser escolhida segundo o Anexo Nacional do Eurocódigo 2, parte 1-1, [9];
- Classe de exposição – Deverá ser escolhida segundo o Eurocódigo 2, parte 1-1, [9].

Na Figura 4.14 pode-se ainda verificar que um dos campos se encontra a vermelho, isto acontece por ter sido introduzido um carácter incorrecto (-1), nestes casos o programa detecta e não deixa o programa correr mandando um sinal de aviso para o utilizador proceder a alteração.

É de referir que muitos dos *inputs* são de introdução através de escolha de opção por scroll, sendo esse o caso dos diâmetro das armaduras, escolhas de resistência do aço e de betão, classe estrutural, classe de exposição, redistribuição, carga variável, coeficiente de combinação frequente, etc.

No caso da escolha da classe estrutural deve ter-se em conta como base o definido pela Anexo Nacional do Eurocódigo 2, parte 1-1, [9], que define como Classe estrutural para uma estrutura com tempo de vida útil até 30 anos como S3 e para 50 anos como S4 devendo estas classes ser aumentadas ou diminuídas em função da Classe de exposição e de alguns factores definidos no Quadro 4.1.

As Classes de exposição são descritas no scroll para que o utilizador não tenha que recorrer aos Eurocódigos na utilização do programa.

As Classes estruturais usadas na Quadro 4.1 estão de acordo com as Especificações do LNEC E 464:2005 – “Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais”[13], e as verificações feitas pelo programa respeitam as especificações do LNEC para recobrimentos mínimos e nominais para 50 e 100 anos.

Quadro 4.1 – Incrementos a Classificação estrutural recomendada, [9].

Classe Estrutural							
Critério	Classe de Exposição de acordo com o Quadro 4.1 do EN1991-1-1						
	X0	XC1	CX2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Tempo de vida útil de projecto de 100 ano	aumentar	aumentar	aumentar	aumentar	aumentar	aumentar	aumentar
	2 classes	2 classes	2 classes	2 classes	2 classes	2 classes	2 classes
Classe de Resistência ^{1) 2)}	≥C30/37	≥C30/37	≥C35/45	≥C40/C50	≥C40/50*)	≥C40/50*)	≥C45/55*
	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir
	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe
Garantia especial de Controlo da qualidade da produção de betão	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir	reduzir
	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe	1 classe

*)≥C50/60 quando cimento utilizado for CEM I ou CEM IIA

**)≥C60/75 quando cimento utilizado for CEM I ou CEM IIA

1)Considera-se que a classe de resistência e a razão razão água-cimento estão relacionadas. Poderá considerar-se uma composição especial a fim de obter uma baixa permeabilidade.

2)O limite pode ser reduzido de uma classe de resistência se a introcção de ar for superior a 4%

4.3.3 MÉTODOS SIMPLIFICADOS

Os Métodos simplificados são baseados na redução da secção resistente de betão e das características da resistência do aço com a temperatura. Nos dois métodos apresentados (Isotérmica de 500°C e Zonas) o cálculo, para as várias secções, é feito de forma idêntica apenas mudando a forma como se chega à secção reduzida. Por esse motivo o programa apresenta, entre os dois métodos, inputs e páginas idênticas, apenas mudando no que se refere à redução de secção.

Estes Métodos não necessitam nem usam programas complementares como nos Métodos Tabelados.

Em todos os métodos irá ser necessária a identificação das temperaturas a que as armaduras estão sujeitas, pelo que são disponibilizados no Manual de utilizador os mesmos perfis de temperatura segundo o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], existente no Anexo A2 da presente dissertação.

4.3.3.1 Lajes e Vigas (M+ e M-)

No caso de vigas e lajes, o programa usa métodos idênticos nos dois casos, considerando apenas que no caso das lajes não é necessária a largura da secção; O utilizador terá no entanto que ter em atenção escolher o programa certo para o caso de momentos positivos ou negativos. Na Figura seguinte é demonstrado um exemplo da apresentação dos resultados.

Resultados

$M_{rd,fi}$	78.06825035	kNm
$M_{ed,fi}$	127.7045679	kNm
x	0.019323308	m
Ext. inf.	0.116047012	mm
Ext. sup.	-0.00338287	mm
a500	50	mm
Resultado	KO	

Fig. 4.15 – Exemplo de resultados para o caso de lajes e vigas.

Em que:

- $M_{rd,fi}$ – Momento resistente para a situação de incêndio;
- $M_{ed,fi}$ – Momento aplicado para situação de incêndio;
- x – posição do eixo neutro;
- Ext. inf. – extensão da armadura inferior;
- Ext. sup. – extensão da armadura superior;
- a₅₀₀ – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C;
- Resultado – “OK” ou “KO” conforme verifique ou não a resistência ao fogo da secção.

Na Figura seguinte são então apresentados os valores de *input* a introduzir para se poder proceder ao cálculo da verificação da resistência da secção.

Vigas M+ Métodos Simplificados Isotérmica a₅₀₀

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo 60 min

Geometria
b 0.3 m
h 0.6 m
rec 25 mm
l 2 m
l_{inf} 2 m

Resistências
Classe Betão 20/25
Tipo de Aço 500
f_{ck} 20000 KPa
f_{yk} 500000 KPa

Armadura de Compressão
N^a varões 4
Ø varões 12 mm

Armadura de Tração
1º Nível
N^a varões 2
Ø varões 12 mm
a 37 mm
Varão Temp °C
1 500
2 500
2º Nível
N^a varões 2
Ø varões 16 mm
a 39 mm
Varão Temp °C
1 600
2 600

Estribos
Ø 6 mm

Isotérmica 500°C
a₅₀₀ 22 mm

Ações
q_k Cat A: Pavimen
ψ_{1,1} Cat A: Habitac

Limpar Calcular

Fig. 4.16 – Exemplo da página de *inputs* para o caso de lajes e vigas, como viga da Figura 4.17.

Como se pode verificar, alguns dos *inputs* são idênticos aos já utilizados no caso dos métodos anteriores. Sendo os restantes:

l – comprimento da viga ao laje;
 l_{inf} – largura de influência das acções a que o elemento está sujeito (no caso da laje =1);
 Níveis de armadura – Nos níveis de armadura deverá considerar como na Figura 4.17 e Figura 4.18 para diferentes casos;
 N° varões – número de varões para cada nível, o tamanho da tabela de temperatura irá variar em função deste valor;
 a – distância da face da secção ao eixo da armadura que deverá ser calculado pela expressão (4.3) para cada Nível/Tipo de armadura;
 $Temp^\circ C$ – temperatura a que se encontra cada um dos varões da armadura de tracção;
 a_{500} – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C, Figura 3.11;

$$a = rec + \phi_{estrib} + \frac{\phi_{arm}}{2} \quad (4.3)$$

Em que:

rec - Recobrimento das armaduras;
 ϕ_{estrib} - Diâmetro dos estribos;
 ϕ_{arm} - Diâmetro da armadura.

Na Figura 4.17, podemos ver dois exemplos das armaduras que se devem introduzir no programa. No primeiro caso é apresentada uma viga com dois níveis de armadura de tracção com o mesmo tipo de diâmetro em cada nível, enquanto que no segundo temos um nível com dois tipos de diâmetro de armadura.

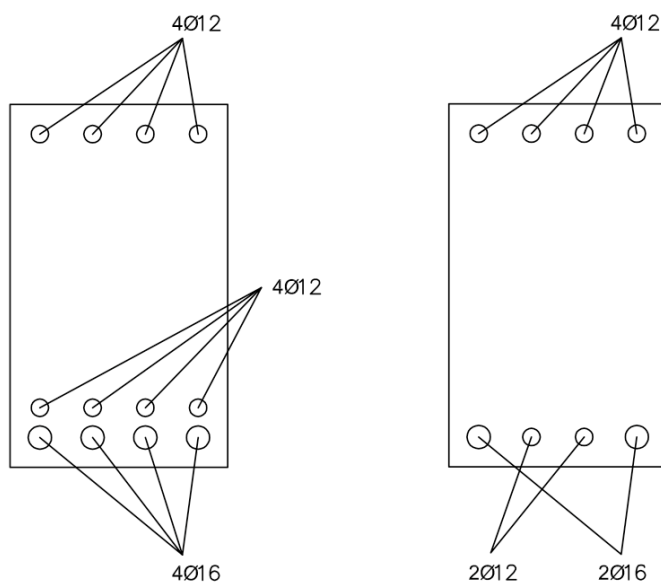


Fig. 4.17 – Exemplo de armaduras para Vigas.

Na Figura 4.18, são-nos apresentados exemplos semelhantes. Neste caso deve-se introduzir todas as armaduras por metro de laje.

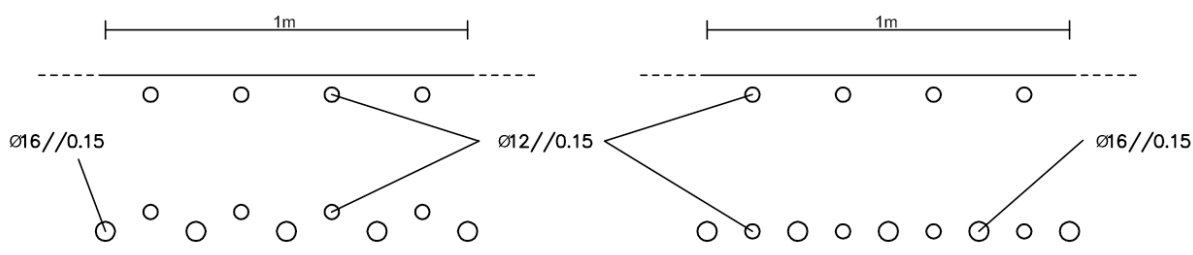


Fig. 4.18 – Exemplo de armaduras para Lajes.

O utilizador deve ter em atenção que para este método é considerado que a face superior dos elementos não está sujeita à acção do fogo.

4.3.3.2 Pilares e Paredes Tracção/Compressão simples (N)

Para pilares e paredes o programa irá apresentar páginas de *inputs* iguais, como considerado para vigas e lajes. Neste caso não existe *input* de armadura de compressão, pois considera-se que as figuras são simétricas, sendo a armadura superior idêntica à inferior e estando, para pilares, as duas sujeitas a acção da temperatura.

Na Figura seguinte é apresentado um exemplo da apresentação dos resultados.

Resultados

Resultados	
$N_{rd,fi}$	1010.097341 kN
$N_{ed,fi}$	980.7508934 kN
Ext.	0.002 mm
a_{500}	40 mm
Resultado	OK

Fig. 4.19 – Exemplo de resultados para o caso de pilares e paredes a Tracção/Compressão simples.

Em que:

- $N_{rd,fi}$ – Força axial resistente para a situação de incêndio;
- $N_{ed,fi}$ – Força axial aplicado para situação de incêndio;
- Ext. – extensão das armaduras;
- a_{500} – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C;
- Resultado – “OK” ou “KO” conforme verifique ou não a resistência ao fogo da secção.

Na Figura seguinte são então apresentados os valores de *input* a introduzir para se poder proceder ao cálculo da verificação da resistência da secção.

Pilares N

Métodos Simplificados

Isotérmica a₅₀₀

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo min

Geometria
b m
h m
a_{inf} m²

Resistências
Classe Betão
Tipo de Aço
f_{ck} KPa
f_{yk} KPa

Armadura
Tipo 1
Nº varões *
Ø varões mm

Varão	Temp °C
1	500
2	500
3	500
4	500

Tipo 2
Nº varões *
Ø varões mm

Isotérmica 500°C
a₅₀₀ mm

Ações
q_k
ψ_{1,1}
Tipo de Força

Fig. 4.20 – Exemplo da página de *inputs* para o caso de pilares e paredes a Tracção/Compressão simples.

Em que:

- a_{inf} – área de influência das acções a que o elemento está sujeito, no caso de paredes l_{inf} ;
- Tipos de armadura – Neste caso deverá considerar dois tipos de armadura, sendo indiferente a sua localização, como exemplo temos a Figura 4.21;
- Nº varões – número de varões para cada nível, o tamanho da tabela de temperatura irá variar em função deste valor;
- Temp°C – temperatura a que se encontra cada um dos varões da armadura de tracção;
- Tipo de força – Deve-se usar uma opção entre Compressão e Tracção.

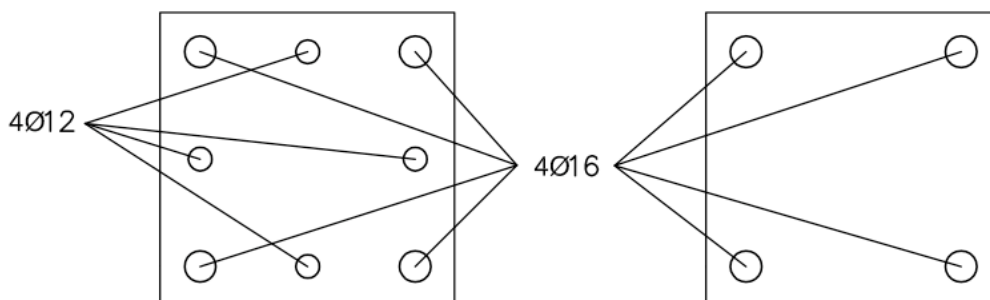


Fig. 4.21 – Exemplo de armaduras para Pilares com esforço axial.

No caso de pilares, considera-se sempre que estão todas as faces expostas ao fogo e para as paredes a parte superior não irá estar, estando as suas armaduras à temperatura ambiente (20°C).

4.3.3.3 Pilares e Paredes em flexão composta (N+Mx)

No caso de pilares e paredes em flexão composta, deverá ter-se em consideração o mesmo princípio de simetria aplicado no ponto anterior. Neste caso iremos ter dois níveis de armadura, podendo ter cada um deles dois tipos, como se pode ver na Figura 4.23. Na Figura seguinte é apresentado um exemplo dos resultados.

Resultados

$M_{rd,fi}$	129.3734198	kNm
$M_{ed,fi}$	153.2183395	kNm
$N_{rd,fi}$	960.0000000	kN
$N_{ed,fi}$	788.8901234	kN
x	0.157888097	m
Ext. inf.	0.004502503	mm
Ext. sup.	0.002635463	mm
a500	50	mm
Resultado	OK	

Fig. 4.22 – Exemplo de resultados para o caso de pilares e paredes em flexão composta.

Em que:

- $M_{rd,fi}$ – Momento resistente para a situação de incêndio;
- $M_{ed,fi}$ – Momento aplicado para situação de incêndio;
- $N_{rd,fi}$ – Esforço axial resistente para a situação de incêndio;
- $N_{ed,fi}$ – Esforço axial aplicado para situação de incêndio;
- x – valor de espessura de betão a compressão;
- Ext. inf. – extensão da armadura inferior;
- Ext. sup. – extensão da armadura superior;
- a500 – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C;
- Resultado – “OK” ou “KO” conforme verifique ou não a resistência ao fogo da secção.

Na Figura seguinte são então apresentados os valores de *input* a introduzir para se poder proceder ao cálculo de verificação da resistência da secção.

Pilares N+Mx
Métodos Simplificados
Isotérmica a500

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo 60 min

Geometria

b 0.3 m
h 0.6 m
rec 25 mm
a_{inf} 2 m²

Resistências

Classe Betão 20/25
Tipo de Aço 500
f_{ck} 20000 KPa
f_{yk} 500000 KPa

Armadura (Nível 1)

a 39 mm
Tipo 1
Nº varões 4
Ø varões 16 mm

Varão	Temp °C
1	500
2	400
3	400
4	500

Tipo 2
Nº varões 0
Ø varões 8 mm

Armadura (Nível 2)

a 0.3 mm
Tipo 1
Nº varões 1
Ø varões 16 mm

Varão	Temp °C
1	300

Tipo 2
Nº varões 0
Ø varões 8 mm

Estridos

Ø 6 mm

Isotérmica 500°C

a500 22 mm

Acções

q_k Cat A: Pavimen
ψ_{1,1} Cat A: Habitagi
Nível carga [0-0.8] 0.6

Limpar Calcular

Fig. 4.23 – Exemplo da página de *inputs* para o caso de pilares e paredes em flexão composta.

Em que:

Nível de armadura – Considera-se dois níveis de armadura inferior, poderá ver exemplos de diferentes distribuições de armadura na Figura 4.24;

Tipos de armadura – Considerar um ou dois tipos de armadura em cada nível

Nº varões – número de varões para cada nível, o tamanho da tabela de temperatura irá variar em função deste valor;

Temp°C – temperatura a que se encontra cada um dos varões da armadura de tracção;

Nível de carga – Considerar em função do esforço axial pela expressão (4.4) (Nota: considerar sempre valores positivos)

$$v = \frac{Ned}{b \cdot h \cdot f_{cd}} \quad (4.4)$$

Em que:

v - Nível de carga;

Ned - Valor de cálculo do esforço normal actuante;

b - Largura da secção;

h - Altura da secção;

f_{cd} - Valor de cálculo da Tensão de rotura do Betão de compressão, à temperatura ambiente.

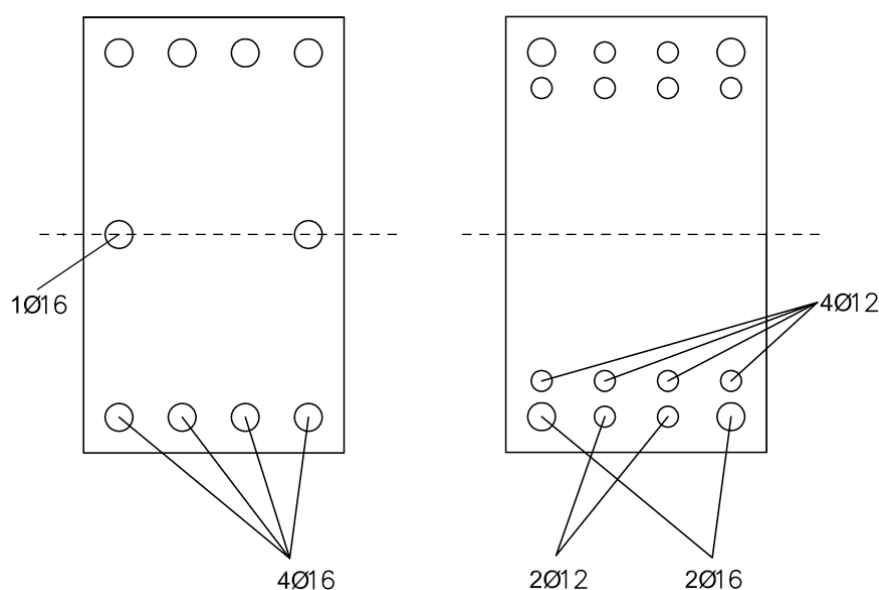


Fig. 4.24 – Exemplo de armaduras para Pilares em flexão composta.

4.3.3.4 Pilares flexão desviada (N+Mx+My)

No caso de flexão desviada, consideramos sempre que todas as faces estão expostas ao fogo, sendo afectada de forma simétrica nas duas direcções. Iremos também considerar as armaduras simétricas em cada direcção, ou seja, a armadura superior e inferior iguais e a da esquerda e direita também.

Na Figura seguinte é apresentado um exemplo dos resultados.

Resultados

$M_{rd,fi,x}$	127.1072987	kNm
$M_{ed,fi,x}$	134.7667785	kNm
$M_{rd,fi,y}$	254.2145975	kNm
$M_{ed,fi,y}$	269.5335571	kNm
$N_{rd,fi}$	900.0000000	kN
$N_{ed,fi}$	788.2901234	kN
a_{500}	50	mm
Resultado	KO	

Fig. 4.25 – Exemplo de resultados para o caso de pilares em flexão desviada.

Em que:

- $M_{rd,fi,x}$ – Momento resistente para a situação de incêndio na direcção X;
- $M_{ed,fi,x}$ – Momento aplicado para situação de incêndio na direcção X;
- $M_{rd,fi,y}$ – Momento resistente para a situação de incêndio na direcção Y;
- $M_{ed,fi,y}$ – Momento aplicado para situação de incêndio na direcção Y;
- $N_{rd,fi}$ – Esforço axial resistente para a situação de incêndio;
- $N_{ed,fi}$ – Esforço axial aplicado para situação de incêndio;
- x – valor de espessura de betão a compressão;
- a_{500} – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C;
- Resultado – “OK” ou “KO” conforme verifique ou não a resistência ao fogo da secção.

Na Figura seguinte são então apresentados os valores de *input* a introduzir para se poder proceder ao cálculo de verificação da resistência da secção.

Pilares N+Mx+My
Métodos Simplificados
Isotérmica a_{500}

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo 60 min

Geometria

b 0.3 m
h 0.6 m
rec 25 mm
 a_{ref} 2 m²

Resistências

Classe Betão 16/20
Tipo de Aço 400
 f_{ck} 16000 KPa
 f_{yk} 400000 KPa

Armadura Horizontal

a 39 mm
Tipo 1
Nº varões 3
Ø varões 16 mm

Varão	Temp °C
1	500
2	300
3	300

Tipo 2
Nº varões 0
Ø varões 8 mm

Armadura Vertical

a 39 mm
Tipo 1
Nº varões 3
Ø varões 16 mm

Varão	Temp °C
1	300
2	300
3	500

Tipo 2
Nº varões 0
Ø varões 8 mm

Estribos

Ø 6 mm

Isotérmica 500°C

a_{500} 22 mm

Ações

q_k Cat A: Varanda
 $\psi_{1,1}$ Cat D: Comercial
Nível carga [0-0.8] 0.5
 M_x/M_y 0.9

Limpar Calcular

Fig. 4.26 – Exemplo da página de *inputs* para o caso de pilares e paredes em flexão composta.

Neste caso os *inputs* são muito parecidos com os da flexão composta. Como se pode observar é acrescentada a relação, M_x/M_y , sendo que todos os momentos resistentes irão ser calculados em função desse valor, e cada uma das quatro faces apenas irá ter um nível de armadura.

Deverá ser tida em atenção a Figura 4.27 na distribuição das armaduras, nunca se devendo pôr a armadura de canto como se apresenta no exemplo. Isto acontece pois o programa irá automaticamente

considerar a armadura de canto como sendo igual ao canto oposto da face, evitando desta forma que essa armadura seja duplicada nos cálculos para as duas direcções.

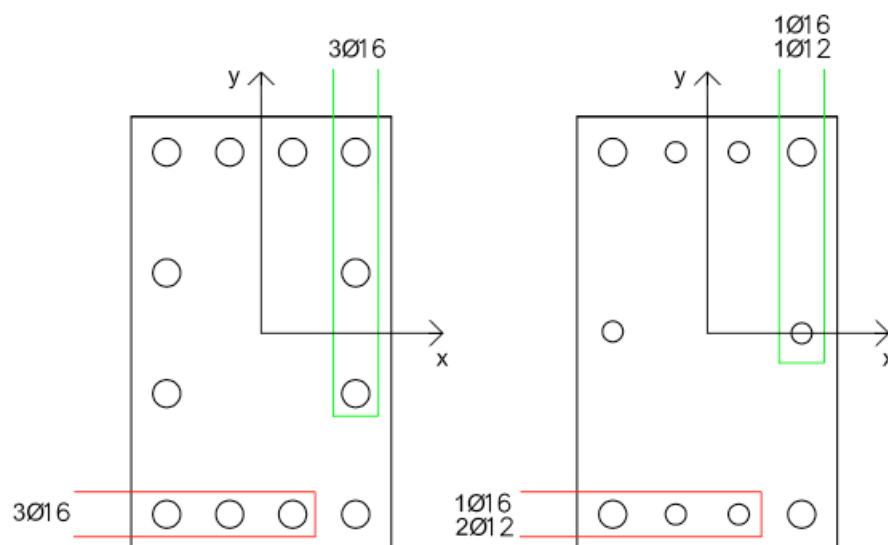


Fig. 4.27 – Exemplo de armaduras para Pilares em flexão desviada.

4.3.3.5 Cálculo das secções reduzidas

Como foi dito no início, os programas das Zonas e da Isotérmica de 500°C, apenas irão variar em termos de introdução de dados da figura. Na imagem seguinte é apresentada a página de *inputs* para os programas dos métodos das Zonas.

Cálculo de a_z

Nº secções *

Temp. med °C

Varão	Temp °C
1	150
2	250
3	500

Fig. 4.28 – Exemplo da página de *inputs* para o Método das Zonas.

Em que:

- Nº secções – Número de secções em que deve ser dividida metade da secção (mínimo 3 secções);
- Temp. med – Temperatura média de cada secção ($K_{c(0m)}$);
- Temp °C – Temperatura média de cada secção ($K_{c(0n)}$).

Deverá ter-se em atenção que quanto maior for o número de secções, maior será a precisão do método. As temperaturas deverão ser dadas em conformidade com a Figura 3.11 g). No caso de lajes e paredes deverá ser tido em consideração que uma das faces não se encontra exposta, logo a $T_{c(\theta_m)}$, deverá ser a temperatura da face não exposta, o valor de $K_{c(\theta_1)}$ o da secção mais próxima da face exposta e o $K_{c(\theta_n)}$ o da secção mais próxima da secção não exposta.

4.3.3.6 Perfis de temperatura

Como já foi referido no capítulo anterior, para se aplicar o Método das Zonas e da Isotérmica de 500°C, é necessário conhecer as temperaturas instaladas, correspondente ao tempo de resistência ao fogo exigida aos elementos estruturais. Estas temperaturas vão ser usadas para se poder saber a temperatura das armaduras e para se poder proceder à redução da secção de Betão. Para tal é preciso conhecer os perfis de temperatura de cada secção.

Estes perfis de temperatura geralmente são feitos recorrendo-se a programas de métodos de elementos finitos que só com recurso a licenças com custos bastante elevados podem ser usados. Por esse motivo o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], apresenta várias hipóteses de perfis de temperatura para secções de uso comum.

Na Figura 4.29 é dada a temperatura em função dos vários escalões de tempo e da distância a face exposta ao fogo, que se deve usar para Paredes e Lajes.

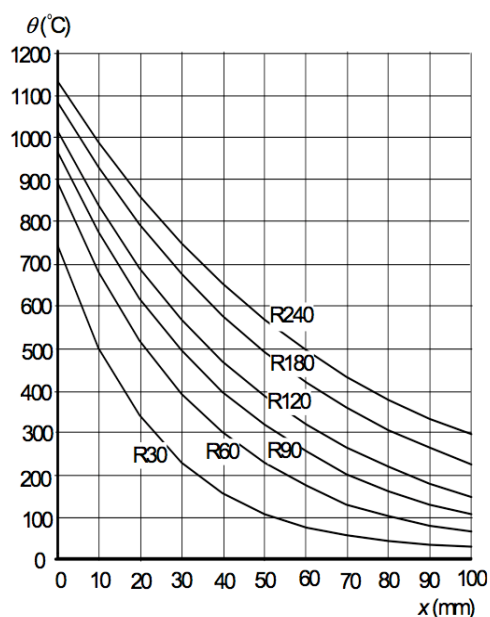


Fig. 4.29 – Perfil de temperatura para lajes e paredes.

No caso de vigas e pilares deve-se sempre considerar os perfis de temperatura em função da existência de uma divisão destes em partes simétricas, Fig 4.30. No caso de vigas, como a face superior não está exposta ao fogo, deve ser considerado que as linhas isotérmicas dos perfis inferiores (ver Figura 4.30) vão acompanhar as faces laterais.

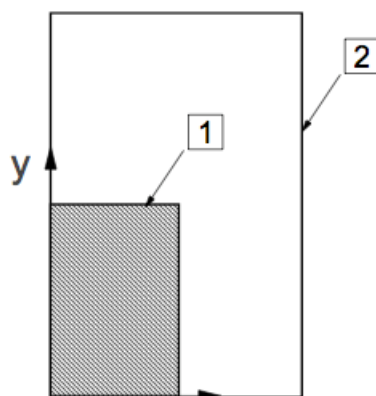


Fig. 4.30 – Superfície da secção transversal para a qual são apresentados os perfis de temperatura; 1) Superfície do perfil de temperatura; 2) Secção transversal total.

Na Figura são apresentados como exemplos dois perfis de temperatura, sendo remetidos para anexo os perfis de temperatura apresentados pelo Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

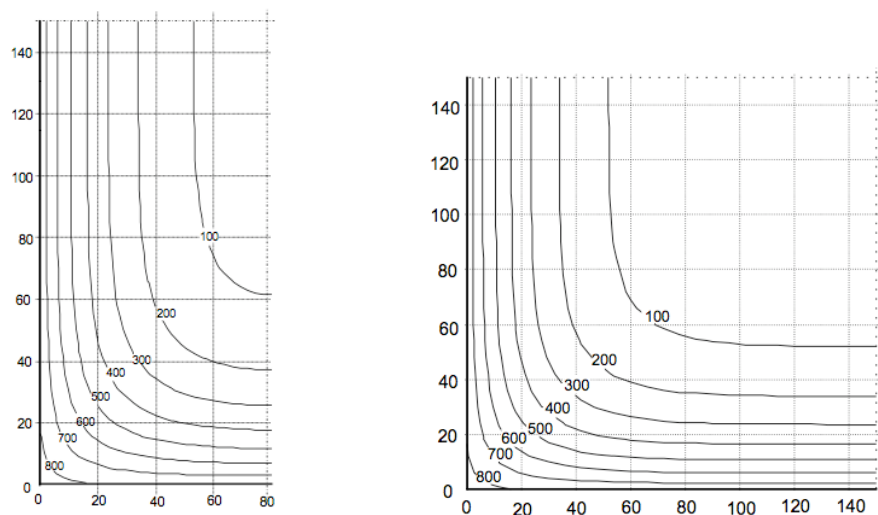


Fig. 4.31 – Exemplo de perfil de temperatura para Vigas e Pilares.

5

ADAPTAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS TABELADOS, ZONAS E ISOTÉRMICA DOS 500°C

Neste capítulo vão ser apresentadas as metodologias, algoritmos e opções feitas ao longo do desenvolvimento do programa, assim como as suas limitações.

Os métodos tabelados apresentam uma metodologia mais simples que os simplificados, embora em termos de interface se apresentem como mais complexos devido aos programas complementares. Estes métodos são baseados em instruções simples, para a verificação das condições de aplicação, do tipo *if* -> *then*, e cálculos simples para cálculos intermédios. Na parte de consulta das tabelas, largura mínima e distância do eixo das armaduras a face, são um pouco mais complexos pois podem levar a algumas iterações e interpolações. Irão portanto ser apresentados partes e metodologias para os métodos mais complexos.

Enquanto que nos métodos tabelados já está tudo definido no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], nos métodos simplificados apenas vem indicado como se deve proceder para a redução das secções de betão e as reduções das características resistentes do aço. Irá ser feita uma apresentação mais alargada dos métodos de cálculo para cada tipo de secção, as suas limitações, assim como as opções tomadas para chegar a eles.

5.1. MÉTODOS TABELADOS

No caso dos métodos tabelados iremos apenas apresentar dois casos, por serem os dois mais representativos dos processos usados nos programas:

- Pilares Método C – Este é o programa que apresenta a maior complexidade de consulta das tabelas, sendo que todas as outras são mais simples em termos de programação.
- Lajes Nervuradas – Estas vão ser apresentadas, pois requerem a utilização das tabelas das vigas, das lajes maciças e das lajes nervuradas, sendo um bom exemplo do método que necessita de múltiplos métodos integrados.

São também remetidos para o Anexo A3 os programas completos de vigas contínuas e vigas sujeitas a momentos positivos.

5.1.1. PILARES MÉTODO C

Neste método irão ser feitas todas as verificações e cálculos intermédios necessários para a aplicação das tabelas. No caso das verificações não passarem, irá ser enviada para o utilizador uma informação descritiva. Na Figura 5.1 é apresentada a verificação para o comprimento da esbelteza.

```
teta = float(geol) / i

if teta>80:
    results["resultado"] = "Não aplicável"
    results["info"] = "Valor de  $\lambda$  maior que 80"
    results["amin"] = ""
    return
```

Fig. 5.1 – Verificação do comprimento de esbelteza pelo programa.

O programa faz um cálculo e verificação para saber qual das 9 tabelas se aplica, como definido pelo Quadro 3.7.

No caso de consulta das tabelas, o programa irá precisar da esbelteza da peça, λ , do nível de carregamento, n , e da resistência ao fogo requerida. Como se pode ver pela composição do Quadro 3.8, terá que se fazer uma interpolação entre colunas e linhas para se chegar aos valores pretendidos das dimensões mínimas para cada uma das resistências pretendidas.

Através dos valores obtidos, o programa irá buscar as duas linhas onde o valor de resistência e esbelteza se posiciona e, dessas duas linhas, irá buscar as duas colunas da posição do nível de carregamento. Para um exemplo de um pilar com Resistência R30, Esbelteza 45 e nível de carga 0,2, vê-se os valores do quadro seguinte:

Quadro 5.1 – Parte do Quadro 3.8.

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm] Largura b_{min} , distância ao eixo a Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	40	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	50	150/25*	150/25*	150/25*	200/25*
	60	150/25*	150/25*	200/25*	250/25*
	70	150/25*	150/25*	250/25*	300/25*
	80	150/25*	200/25*	250/30:300/25*	350/25*

Neste caso, em cada posição apenas irá existir um valor para b e para a , mas em muitos dos casos temos dois, o que implica a realização de interpolações mais complexas.

Depois irá ser feita uma interpolação em função do nível de carga entre cada valor de cada linha, que irá originar para cada uma destas 1, 2 ou 4, valores conforme o número de valores por posição. Esta interpolação vai ser feita com recurso a uma função que irá criar dois novos conjuntos de valores. A função é apresentada na Figura 5.2.


```
def interpolação(linha, const):
    (col1, col2) = linha
    newLine = []

    for line1 in col1:
        b1 = line1[0]
        a1 = line1[1]
        for line2 in col2:
            b2 = line2[0]
            a2 = line2[1]

            if b2=="*" or b1=="*":
                return "error"

            b = b1 + (b2 - b1) * const
            a = a1 + (a2 - a1) * const
            newLine.append((b,a))

    return tuple(newLine)
```

Fig. 5.2 – Exemplo de interpolação simples para a obtenção de n valores para cada linha da tabela

De seguida o programa irá proceder à interpolação para a esbelteza, entre cada conjunto de valores, seguindo a sequência do valor mais baixo de dimensões mínimas para os mais altos, e irá verificar se algum deles cumpre as dimensões da secção. Este processo poderá ir, no limite, até a um conjunto de 16 pares de valores. No caso de nenhum dos valores ser verificado irá ser enviada uma informação. Esta função é demonstrada na Figura 5.3.

```
x = 0
for cell in linha1:
    b1 = cell[0]
    a1 = cell[1]

    for cell in linha2:
        b2 = cell[0]
        a2 = cell[1]

        b = float(b1) + (b2 - b1) * precuw
        a = float(a1) + (a2 - a1) * precuw

        if bi >= b:
            if ai >= a:
                results["resultado"] = "OK"
                results["info"] = "bmin=" + str(b) + "\namin=" + str(a) + "\nb=" + str(bi) + "\na=" +
str(ai)
                results["amin"] = a
                return
            else:
                x = x + 1
        elif x == 16:
            results["resultado"] = "KO"
            results["info"] = "bmin=" + str(b) + "\namin=" + str(a) + "\nb=" + str(bi) + "\na=" + str(ai)
            results["amin"] = a
            return
        else:
            x = x + 1
```

Fig. 5.3 – Parte do programa que faz a interpolação final e verificação dos valores mínimos.

Através deste conjunto de passos vão ser verificados todos os valores possíveis. Este é um dos processos que traz mais vantagens ao utilizador, pois permite maximizar os valores de verificação sem se perder tempo.

5.1.2. LAJES NERVURADAS

Este método é o método em que o número de direcções das armaduras, e no caso da redistribuição de lajes nervuradas contínuas, irá originar a que as tabelas a serem consultadas não se limitem apenas a uma.

No exemplo seguinte (Figura 5.4) é apresentado o programa para lajes nervuradas contínuas. No início do programa este vai verificar se a laje é armada em uma ou duas direcções, e entre uma opção ou outra irá chamar programas diferentes para verificar a laje e as nervuras. No caso de armada em apenas uma direcção irá verificar as nervuras como sendo vigas e a laje como sendo uma laje maciça. Se for armada nas duas direcções, irá utilizar as tabelas para lajes nervuradas.

```
def calcFireResistance(rfogo, bv, recv, destrbv, armtracv, hil, dtracv, nxarmda, redestri):

    if nxarmda == 1:
        vigas = calcFireResistancevigassa(rfogo, bv, recv, destrbv, armtracv, redestri)
        lajes = calcFireResistencelajessa(rfogo, hil, recv, dtracv)

        if vigas[0] == "OK" and lajes[0] == "OK":
            results["resultado"] = "OK"
            results["info"] = "anervura.min =" + str(vigas[2]) + "\nbnervura.min =" + str(vigas[1]) + "\nalaje.min =" + str(lajes[2]) + "\nhlaje.min =" + str(lajes[1])
            results["amin"] = lajes[2]
            return
        else:
            results["resultado"] = "KO"
            results["info"] = "anervura.min =" + str(vigas[2]) + "\nbnervura.min =" + str(vigas[1]) + "\nalaje.min =" + str(lajes[2]) + "\nhlaje.min =" + str(lajes[1])
            results["amin"] = lajes[2]
            return

    if nxarmda == 2:

        table2 = table6

        vigas = calcFireResistencelajecont(rfogo, bv, recv, armtracv, destrbv)
        lajes = calcFireResistencelajessa(rfogo, hil, recv, dtracv)

        if vigas[0] == "OK" and lajes[0] == "OK":
            results["resultado"] = "OK"
            results["info"] = "anervura.min =" + str(vigas[2]) + "\nbnervura.min =" + str(vigas[1]) + "\nalaje.min =" + str(lajes[2]) + "\nhlaje.min =" + str(lajes[1])
            results["amin"] = lajes[2]
            return
        else:
            results["resultado"] = "KO"
            results["info"] = "anervura.min =" + str(vigas[2]) + "\nbnervura.min =" + str(vigas[1]) + "\nalaje.min =" + str(lajes[2]) + "\nhlaje.min =" + str(lajes[1])
            results["amin"] = lajes[2]
            return
```

Fig. 5.4 – Exemplo do programa principal de lajes nervuradas

Este programa serve como exemplo da vantagem de utilização do programa que permite que o utilizador não se preocupe com quais das tabelas a usar, apenas tendo que se preocupar com a escolha do tipo de elemento estrutural.

5.2. MÉTODOS SIMPLIFICADOS

Nos métodos simplificados, como se pôde verificar no capítulo anterior, para o caso de lajes e vigas e o caso de paredes e pilares, os processos de cálculo são semelhantes. Por esse motivo neste capítulo apenas se irá fazer a exposição dos seguintes processos:

- Vigas Momentos Positivos;
- Pilares sujeitos a esforço axial simples
- Pilares sujeitos a flexão composta
- Pilares sujeitos a flexão desviada

Todos os casos vão ser apresentados para o Métodos da Isotérmica de 500°C, visto a única diferença entre os dois métodos simplificados ser o cálculo da secção reduzida de betão. Estes processos de cálculo são idênticos aos apresentados no Capítulo 3.

5.2.1. VIGAS MOMENTOS POSITIVOS

As vigas são elementos estruturais que na sua maioria têm apenas como função resistir ao esforço de flexão. O esforço de flexão em estruturas de betão é caracterizado pela sua capacidade resistente depender muito da força de compressão desenvolvida no betão e nas armaduras comprimidas, da força de tracção desenvolvida nas armaduras traccionadas e da distância existente entre estas forças (ver Figura 3.12).

Em todos os métodos feitos para os programas são usadas as equações de equilíbrio, que no caso de vigas são:

$$\sum F_x = 0; \sum M = 0 \quad (5.1)$$

Segundo a fórmula (5.1) o somatório das forças na secção, e o somatório de Momentos em qualquer ponto da secção deverá ser nulo.

Através destas equações de equilíbrio irá chegar-se às equações que definem o cálculo dos momento resistente da estrutura, M_{rd} . Estas equações são consideradas para o caso de um ou dois níveis de armadura inferior, segundo a Figura 4.16. No caso de situações à temperatura ambiente considera-se:

$$x = \frac{F_{s1} + F_{s2} - F_s'}{0.8 \cdot b \cdot f_{cd}} \quad (5.2)$$

$$F_s = n_s \cdot \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \pi \cdot f_{yd} \quad (5.3)$$

$$M_{rd} = 0.8 \cdot b \cdot f_{cd} \cdot x(d - 0.4 \cdot x) + F_{s1}'(d - a') - F_{s2} \cdot (a_2 - a_1) \quad (5.4)$$

Em que:

M_{rd} - Momento resistente
 x - Profundidade do eixo neutro
 F_{s1} - Força de tracção do nível um da armadura inferior
 F_{s2} - Força de tracção do nível dois da armadura inferior
 F_{s1}' - Força de compressão do nível de armadura superior
 f_{yd} - Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço
 f_{cd} - Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
 b - Largura original da peça
 a - Distância entre o eixo das armaduras e o bordo aquecido da secção
 d - Altura efectiva ($d = h - a_1$)
 n_s - número de varões de armadura em cada nível
 ϕ - Diâmetro das armaduras

O programa irá de seguida, através do momento resistente a frio, usar as expressões seguintes para calcular os Momentos aplicados para a situação de incêndio.

$$p_{sd} = \frac{M_{rd} \cdot 8}{l^2} \quad (5.5)$$

$$G_k = \frac{p_{sd} - 1.5 \cdot Q_k}{1.35} \quad (5.6)$$

$$M_{ed,fi} = \eta_{fi} \cdot M_{rd} \quad (5.7)$$

Em que:

M_{rd} - Momento resistente
 $M_{ed,fi}$ - Momento aplicado para a situação de incêndio
 η_{fi} - Nível de carregamento para situação de incêndio, calculado pela expressão (3.8)
 G_k - Valor característico da acção permanente
 Q_k - Valor característico da acção variável
 p_{sd} - Valor de carga distribuída
 l - Comprimento da viga

Irá ser o valor do momento aplicado para a situação de incêndio que o momento resistente em situação de incêndio terá que superar para que se verifique cumprida a resistência da estrutura.

Para o cálculo do Momento resistente para situação de incêndio irá proceder-se de modo análogo à temperatura ambiente, contando-se com a redução da secção reduzida do betão e da resistência das armaduras expostas ao fogo. O programa irá fazer este cálculo tendo em atenção a redução da secção do betão e calcular o factor de redução do aço, K_s , para usar em cada varão.

No cálculo dos factores redutores das características do aço, K_s , o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], apresenta factores para dois tipos de aço, Figura 3.4, no caso do programa este apenas irá trabalhar com aços laminados a quente. O programa irá por defeito calcular todas as armaduras de compressão

pela curva 3 e todas as armaduras de tracção pela curva 1, sendo feita uma verificação das extensões da armadura inferior no fim. Caso as armaduras inferiores não cumpram os 2% de extensão é feito novo cálculo de momentos resistentes usando se apenas a curva 3.

O programa, além das limitações no tipo de aço, considera que todas as armaduras estão a trabalhar em tensão máxima, o que trará alguns erros, principalmente em caso de incêndio. Para o caso de temperatura ambiente é considerado que as armaduras estão próximas da face superior, cumprindo desta forma as extensões que a permitem ter à tensão máxima. No caso de situação de incêndio, o que normalmente acontece é que com a redução da resistência das armaduras inferiores de tracção, a posição do eixo neutro vai progressivamente subindo, aumentando a probabilidade de não estarem em tensão máxima. Com a subida do eixo neutro iremos ter resultados com erros, pois a armadura de compressão irá contribuir para uma subida mais acelerada, podendo atingir valores negativos do eixo neutro para se cumprir a equação de equilíbrio.

No gráfico da Figura 5.5, são apresentados dois casos, de secções idênticas, de cálculo de Momento resistente para situação de incêndio em função da temperatura. No caso 1 é considerado que a armadura superior é calculada com a tensão de cedência do aço, f_{yk} , enquanto que no caso 2 este valor é calculado com a tensão de rotura do betão a tracção, f_{ck} . Pode-se verificar que no primeiro caso iremos ter valores de resistência ao fogo superiores, mas com a evolução da temperatura elas irão reduzir drasticamente até atingir valores negativos. No caso 2 é considerado mais conservativo numa fase inicial mas os seus valores para temperaturas muito elevadas é mais realista.

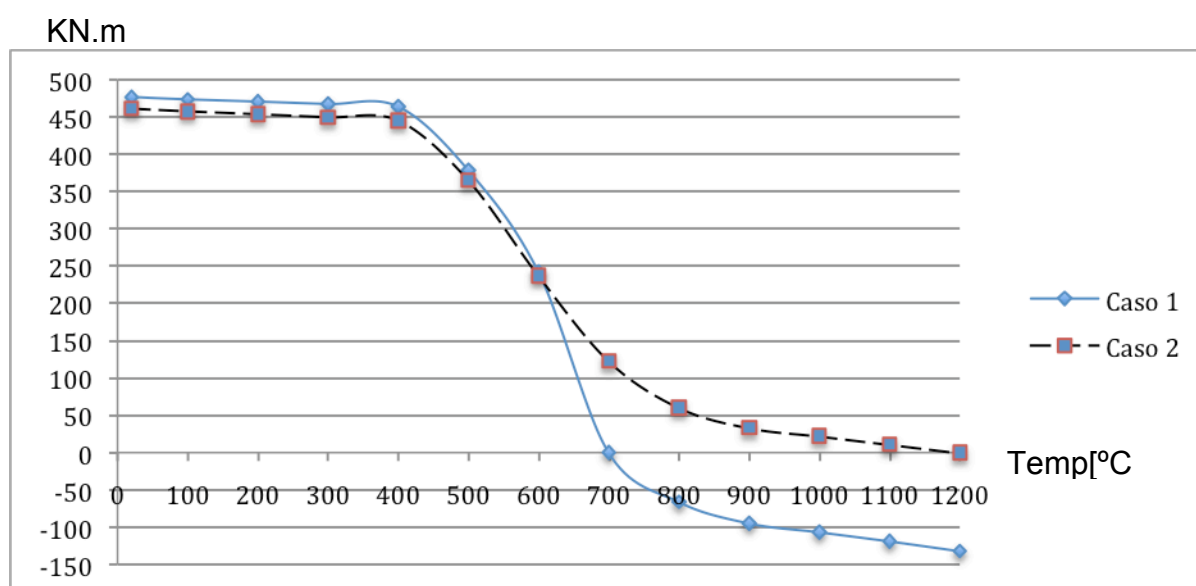


Fig. 5.5 – Gráfico de momentos resistentes em função da temperatura para duas metodologias de cálculo.

Por esse motivo o programa irá sempre calcular os dois casos, escolhendo o valor mais elevado como sendo o momento resistente, impedindo desta forma o “colapso” prematuro não real da secção.

Estes processos poderão ser constatados numa análise do programa integral no Anexo A3.

5.2.2. PILARES SUJEITOS A ESFORÇO AXIAL SIMPLES

Os pilares são elementos estruturais que recebem as cargas das lajes e vigas e as conduzem para as fundações, sendo elementos fundamentais para as estruturas. Embora em raros casos se considere

apenas o esforço axial nos pilares, este caso permite-nos compreender como é que a acção do fogo contribui para a redução da resistência nestes elementos.

O programa considera que para os pilares todas as faces da secção estão expostas ao fogo.

O programa irá também verificar os pilares sujeitos a esforço de compressão e de tracção, considerando-se neste último que o esforço resistente do betão é totalmente desprezado.

Nos casos de compressão considera-se que toda armadura da estrutura está à compressão, utilizando-se a curva 3, Figura 3.4, e limitando-se as extensões da estrutura aos 2‰, desta forma o esforço axial resistente é dado pelas seguintes fórmulas:

$$N_{rd} = A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot \sigma_{s,\varepsilon = 0.2\%} \quad (5.8)$$

$$\sigma_{s,\varepsilon = 0.2\%} = E_s \cdot \varepsilon_s \quad (5.9)$$

Em que:

- N_{rd} - Esforço axial resistente
- f_{cd} - Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço
- A_c - Área de Betão da secção
- A_s - Área total de aço das armaduras
- $\sigma_{s,\varepsilon = 0.2\%}$ - Tensão do aço para a extensão de 2‰
- ε_s - extensão do aço, considerando 2‰
- E_s - Módulo de elasticidade do aço

Para o caso de tracção considera-se apenas a parcela do aço, mas para o valor de cálculo da tensão de rotura do aço,

$$N_{rd} = A_s \cdot f_{yd} \quad (5.10)$$

Estes cálculos vão permitir obter os esforços axiais resistentes, que multiplicados pelo nível de carregamento em situação de incêndio (expressão (5.11)) nos dará o esforço aplicado em situação de incêndio. Para o cálculo do nível de carregamento o valor de G_k irá ser calculado segundo a expressão (5.12).

$$N_{ed,fi} = \eta_{fi} \cdot N_{rd} \quad (5.11)$$

$$G_k = \frac{N_{rd} - 1,5 \cdot Q_k}{1,35} \quad (5.12)$$

O programa irá proceder de seguida ao cálculo do momento resistente em situação de incêndio, aplicando a redução das secções e aplicado o factor de redução da resistência do aço. É apresentado na Figura 5.6 como o programa irá fazer este processo para estruturas apenas sujeitas a compressão.

```
# Cálculo de Nrd
if comprac == 1:
    Nrd = fcd * (b * h) + (narm1 * 400000 * pow((darm1 / 2),2) * 3.141592654) + (narm2 * 400000 *
pow((darm2 / 2),2) * 3.141592654)
else:
    Nrd = (narm1 * fy * pow((darm1 / 2),2) * 3.141592654) + (narm2 * fy * pow((darm2 / 2),2) *
3.141592654)

# Cálculo de Nedfi
qk = ainf * qk
gk = (Nrd - 1.5 * qk) / 1.35
nfi = (gk + yii * qk) / (1.35 * gk + 1.5 * qk)
Nedfi = nfi * Nrd

#calcular fyk(força dos varões) para total dos varões
if comprac == 1:
    fyk = 400000
    fykfogo = 0
    t = 0
    x = 0
    for cell in linha:
        ks = cell
        x = x + 1

        if x <= narm1:
            fykfogo = (ks * fyk * pow((darm1 / 2),2) * 3.141592654) + fykfogo
        else:
            fykfogo = (ks * fyk * pow((darm2 / 2),2) * 3.141592654) + fykfogo

    ext = 0.002

    N = (fck * beq * deq) + fykfogo

    if N >= Nedfi:
        results["resultado"] = "OK"
        results["nrdfi"] = N
        results["nedfi"] = Nedfi
        results["ext"] = ext
        results["a500"] = a500 * pow(10,3)
        return
    else:
        results["resultado"] = "KO"
        results["nrdfi"] = N
        results["nedfi"] = Nedfi
        results["ext"] = ext
        results["a500"] = a500 * pow(10,3)
        return
```

Fig. 5.6 – Cálculo do esforço axial resistente pelo programa.

Pode-se constatar que no fim é feita a verificação da resistência da estrutura para a situação de incêndio, sendo enviada essa informação para o utilizador.

5.2.3. PILARES SUJEITOS À FLEXÃO COMPOSTA

Na grande maioria dos casos os pilares vão estar sujeitos a pelo menos momentos aplicados numa direcção. O programa irá permitir o estudo de pilares quadrados ou rectangulares contendo até 4 níveis de armadura, como se pode ver pelos exemplos demonstrados na Figura 5.7.

O programa apresenta mais uma vez a limitação ao considerar que todas as armaduras apresentam a sua tensão máxima; no entanto pode-se considerar que o seu erro é mais reduzido que para vigas, pois todas as armaduras irão estar sob o efeito da temperatura.

Por outro lado o programa irá fazer uma verificação da posição do eixo neutro. No cálculo dos momentos resistentes o eixo neutro poderá assumir qualquer posição dentro da secção. No caso de vigas é considerado que o eixo neutro se irá posicionar sempre entre a armadura inferior e a superior, mas para o caso de pilares a distribuição das armaduras poderá nem sempre apresentar posições tão extremas.

Na Figura 5.7 são demonstrados os 3 casos possíveis do posicionamento do eixo neutro em relação às armaduras.

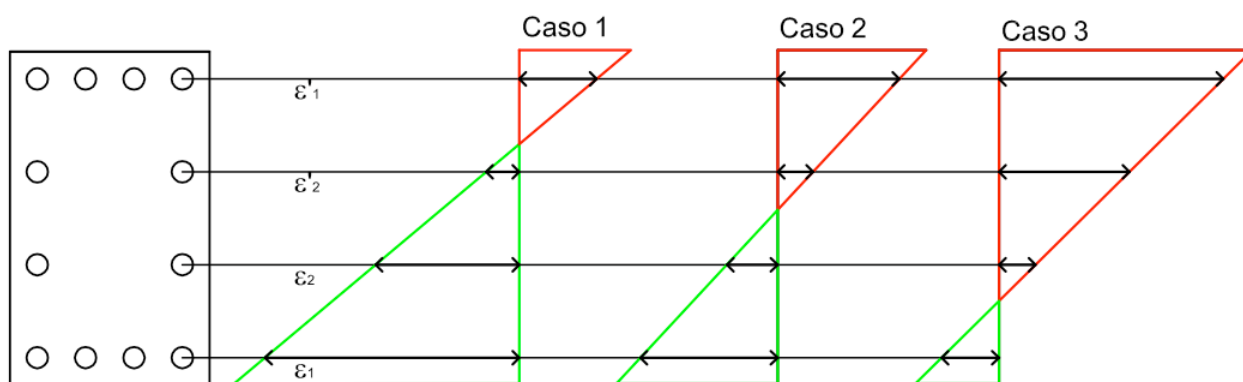


Fig. 5.7 – Diagrama de extensões possíveis em relação ao eixo neutro para pilar modelo.

Como se pode constatar pela Figura 5.7, é considerado que as armaduras que se inserem nas extensões vermelhas estão à compressão enquanto que as outras estarão em tração. O programa inicialmente calcula a estrutura para o caso 1. Irá depois então verificar a posição do eixo neutro, recalculado para o caso 2 e se for preciso o caso 3. Desta forma teremos sempre as armaduras a funcionar correctamente no cálculo dos momentos resistentes.

No caso de pilares sujeitos a flexão composta teremos novas expressões das equações de equilíbrio, tendo em conta sempre o esforço axial:

$$\sum F_x = N; \sum M = 0 \quad (5.13)$$

Segundo a fórmula (5.13) o somatório de todas as forças será igual ao esforço axial.

Optou-se por não se pedir o esforço axial que está aplicado na estrutura mas sim o nível de carga. Desta forma permite-se uma mais fácil utilização no caso de dimensionamento de estruturas. O cálculo do esforço axial será então feito segundo:

$$N = v \cdot h \cdot b \cdot f_{cd} \quad (5.14)$$

Em que:

N - Esforço axial pretendido
 v - Nível de carga do elemento
 $h \cdot b$ - Dimensões da secção

De seguida usando as equações de equilíbrio irá fazer-se o cálculo da posição do eixo neutro e do momento resistente, considerando que neste caso o momento será calculado para o centro geométrico da secção:

$$x = \frac{N + F_{s1} + F_{s2} + F_{s2}' - F_{s1}'}{0.8 \cdot b \cdot f_{cd}} \quad (5.15)$$

$$F_s = n_s \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 \pi \cdot f_{yd} \quad (5.16)$$

$$M_{rd} = 0.8 \cdot b \cdot f_{cd} \cdot x \cdot \left(\frac{h}{2} - 0.4 \cdot x\right) + F_{s1}' \cdot \left(\frac{h}{2} - a_1\right) + F_{s1} \cdot \left(\frac{h}{2} - a_1\right) \quad (5.17)$$

Em que:

M_{rd} - Momento resistente
 N - Esforço axial pretendido
 x - Profundidade do eixo neutro
 F_s - Força de tracção/compressão das armaduras
 f_{yd} - Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
 f_{cd} - Valor de cálculo da tensão de cedência à tracção do aço
 b - Largura original da peça
 a - Distância entre o eixo das armaduras e o bordo aquecido da secção
 n_s - número de varões de armadura em cada nível
 ϕ - Diâmetro das armaduras

No cálculo dos esforços aplicados para situação de incêndio vão ser usadas as expressões (5.11), (5.12) e (5.7).

O programa utiliza a mesma metodologia descrita no cálculo à temperatura ambiente para a situação de incêndio. O programa ao mesmo tempo que verifica a posição do eixo neutro, irá alterar as curvas de redução da resistência do aço, tendo em conta a Figura 3.4. Usando a curva 3 para as armaduras à compressão, irá também reduzir os erros que possam existir por se considerar a tensão máxima nos varões de aço.

De seguida é apresentado na Figura 5.8 como o programa irá proceder à redução das resistências do aço, assim como à verificação da posição do eixo neutro, ao mesmo tempo que se procede ao cálculo do momento resistente de cálculo e cálculo das extensões.

```
#calcular fyk(força dos varões) para total dos varões para cada tipo de aço
fykfogo1 = 0
fykfogo2 = 0
fykfogo3 = 0
fykfogo4 = 0
x = 0
for cell in linha:
    ks = cell
    x = x + 1

    if x <= ri:
        fykfogo1 = (ks * fyk * pow((deqi / 2), 2) * 3.141592654) + fykfogo1
    else:
        fykfogo2 = (ks * fyk * pow((deqii / 2), 2) * 3.141592654) + fykfogo2
x = 0
for cell in linha1:
    ks = cell
    x = x + 1

    if x <= ri:
        fykfogo3 = (ks * fyk * pow((deqi / 2), 2) * 3.141592654) + fykfogo3
    else:
        fykfogo4 = (ks * fyk * pow((deqii / 2), 2) * 3.141592654) + fykfogo4

#calc M e x e exti e exts

x = (Nfi + fykfogo2 + fykfogo2 + fykfogo1 - fykfogo3) / (0.8 * fck * beq)
if (h - a500) < x:
    x = (h - a500)
M = (0.8 * fck * beq) * x * (h / 2 - 0.4 * x) + fykfogo3 * (h/2 - ai) + fykfogo2 * (h/2 - aii) + fykfogo1 * (h/2 - ai) -
fykfogo2 * (h/2 - aii)
if (x) >= aii:
    x = (Nfi + fykfogo1 + fykfogo2 - fykfogo3 - fykfogo4) / (0.8 * fck * beq)
    if (h - a500) < x:
        x = (h - a500)
    M = (0.8 * fck * beq) * x * (h / 2 - 0.4 * x) + fykfogo3 * (h/2 - ai) + fykfogo2 * (h/2 - aii) + fykfogo1 * (h/2 -
ai) + fykfogo4 * (h/2 - aii)
    if (x) >= (h - aii):
        x = (Nfi + fykfogo1 - fykfogo4 - fykfogo4 - fykfogo3) / (0.8 * fck * beq)
        if (h - a500) < x:
            x = (h - a500)
        M = (0.8 * fck * beq) * x * (h / 2 - 0.4 * x) + fykfogo3 * (h/2 - ai) - fykfogo4 * (h/2 - aii) + fykfogo1 * (h/2 -
ai) + fykfogo4 * (h/2 - aii)

x = x + 0.000000000000000001

exti = ((deq - x) / x) * 0.0035

exts = ((x - ai) / x) * 0.0035

#verificação
if exti <= (20 / 1000):
    x = (Nfi + fykfogo3 - fykfogo4 - fykfogo4 - fykfogo3) / (0.8 * fck * beq)
    if (h - a500) < x:
        x = (h - a500)
    M = (0.8 * fck * beq) * x * (h / 2 - 0.4 * x) + fykfogo3 * (h/2 - ai) - fykfogo4 * (h/2 - aii) + fykfogo3 * (h/2 -
ai) + fykfogo4 * (h/2 - aii)
```

Fig. 5.8 – Programa de flexão composta em pilares.

5.2.4. PILARES SUJEITOS A FLEXÃO DESVIADA

O programa de cálculo dos momentos resistentes para a flexão desviada foi aquele que criou mais problemas a ser desenvolvido por ser um processo que normalmente no cálculo à temperatura ambiente se recorre a tabelas e ábacos. A regulamentação normalmente usada, Eurocódigos, não disponibiliza nenhum método de cálculo nem os ábacos e tabelas são possíveis de adaptar a situação de incêndio.

Optou-se por se seguir um método simplificado de cálculo à temperatura ambiente adaptando-se para a situação de incêndio. No Capítulo 3, foram apresentadas três metodologias de cálculo simplificado, dadas por diferentes autores, que se baseiam na consideração separada da flexão composta segundo cada um dos eixos principais de inércia. Iremos então usar um desses 3 métodos simplificados e calcular os momentos resistentes em flexão composta em situação de incêndio e assim obter com aquele método os momentos resistentes em flexão desviada representativos de cada direcção.

Na Figura 5.9 podemos ver um exemplo de uma viga estudada pelos métodos simplificados e pelos ábacos para o cálculo do momento resistente à temperatura ambiente de uma peça onde os momentos nas duas direcções de inércia são iguais. Analisando o gráfico pode-se ver que o método simplificado apresenta valores um bocado conservativos, mas por ser uma verificação e o método ser aplicado quer no cálculo das acções e das resistências, essa diferença perde expressão.

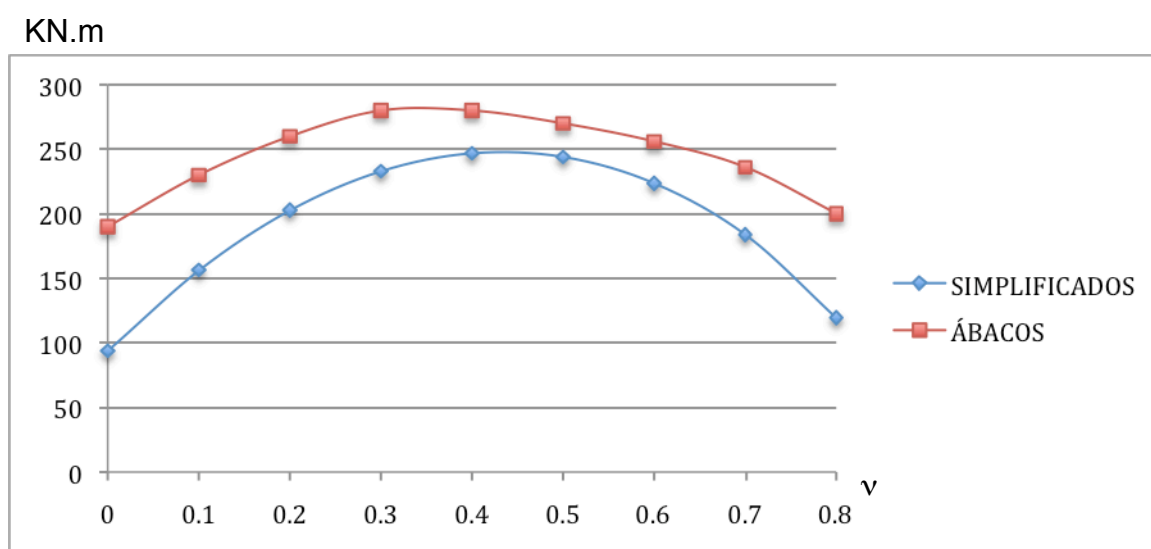


Fig. 5.9 – Gráfico de momentos resistentes à temperatura ambiente segundo as duas metodologias .

Dos 3 métodos aquele que apresentava menos limitações e mais vantagens era o primeiro, sugerido no REBAP, sendo a opção tomada para se adaptar à situação de incêndio. O método irá ser usado como descrito no Capítulo 3, mas em vez de se fornecer os momentos aplicados na secção, fornece-se a relação entre estes, alterando a expressão da seguinte forma:

$$\beta = \frac{M_{Rd,x}}{M_{Rd,y}} \quad (5.18)$$

$$\left(\frac{M_{Rd,x}}{M_{Rd,x0}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{Rd,x}}{\beta \cdot M_{Rd,y0}}\right)^\alpha = 1 \quad (5.19)$$

Desta forma pode calcular-se os momentos resistentes nos dois eixos de inércia como se fossem uma flexão composta e obter os momentos resistentes em flexão desviada.

Este processo terá que ser repetido duas vezes para a situação de temperatura ambiente e em situação de incêndio, como feito para a flexão composta.

6

APLICAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS NA AVALIAÇÃO DE VIGAS, PILARES E LAJES DE UM PROJECTO

Ao longo deste capítulo é feita a aplicação do programa de cálculo desenvolvido durante a dissertação, a um projecto de estruturas de um edifício considerado para a acção do fogo.

6.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O projecto em estudo refere-se à edificação para habitação situada na Rua Manuel Brandão, em Oliveira de Azeméis. O edifício é constituído por uma estrutura reticulada porticada de 8 pisos, com altura total de 21 metros, constituída essencialmente por pilares, vigas e lajes maciças e aligeiradas e muros de suporte. A comunicação entre pisos é assegurada por escadas e caixa de elevador.

Quadro 6.1 – Áreas Brutas de projecto por piso.

SUB-CAVE	CAVE	R/CHÃO	1ºANDAR	2ºANDAR	3ºANDAR	4ºANDAR	5ºANDAR
786m ²	886m ²	889m ²	655m ²	655m ²	655m ²	655m ²	505m ²

Os elementos analisados encontram-se dimensionados devidamente sendo já conhecidas as dimensões dos elementos e as armaduras respectivas, será apenas necessário efectuar a verificação da segurança à acção do fogo. Por esse motivo não se fará uma verificação dos recobrimentos mínimos através do programa desenvolvido e integrado nos métodos Tabelados.

Os materiais previstos para a construção são o betão de agregados siliciosos de densidade normal e classe C25/30 ($f_{ck}=25\text{Mpa}$) e para as armaduras considerou-se aço laminado a quente da classe A400 ($f_{yk}=400\text{Mpa}$) para as armaduras da estrutura em geral e o aço A500 para as redes electrosoldadas.

As sobrecargas e coeficientes frequentes necessárias ao cálculo vão ser considerados conforme os Eurocódigos, sendo que em projecto foram utilizados segundo a antiga regulamentação em vigor (RSAEEP).

Na Figura seguinte é apresentado um exemplo de uma planta de um dos pisos de habitação do edifício.

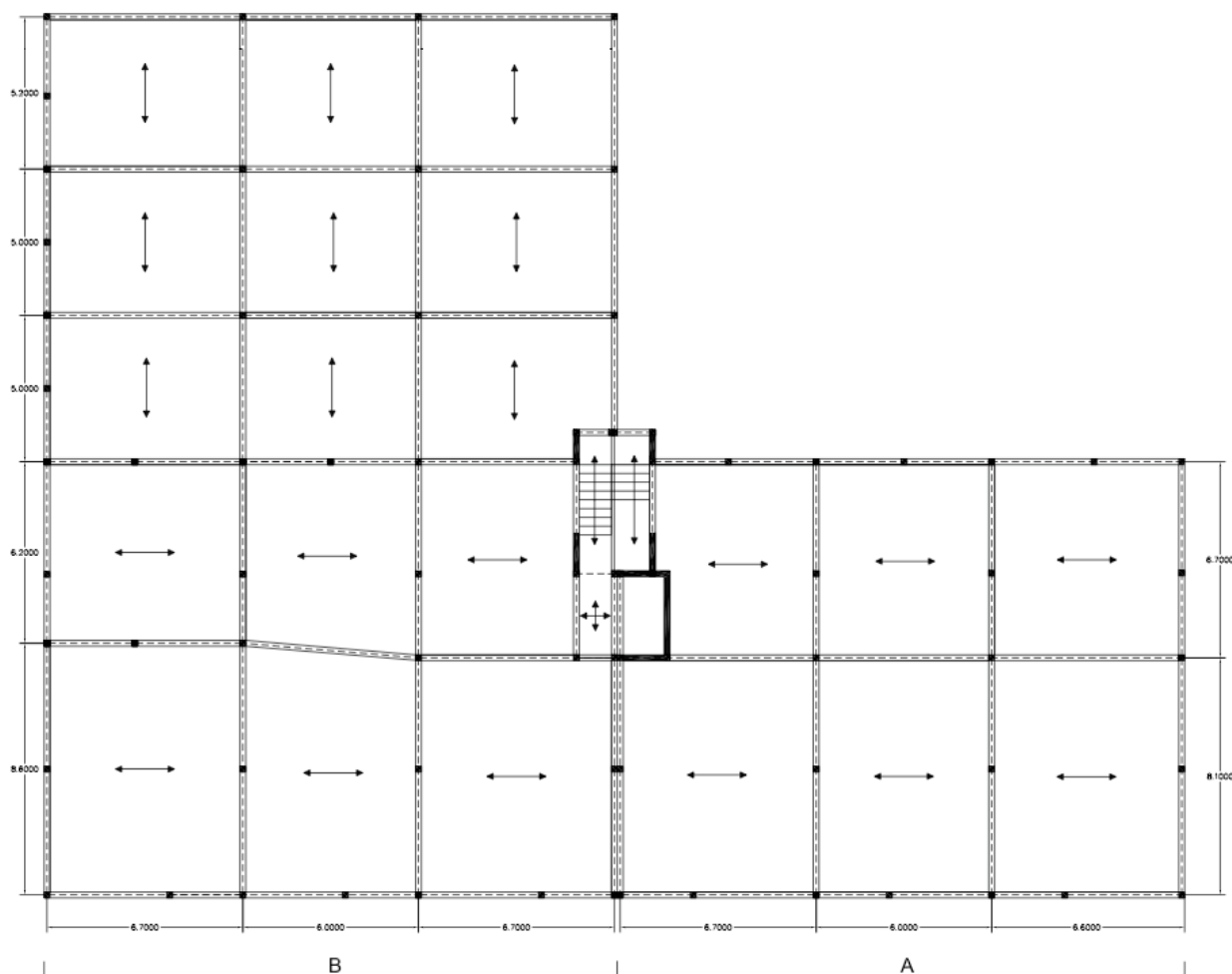


Figura 6.1 – Planta estrutural de um piso do edifício.

No total da estrutura foram analisados os seguintes elementos estruturais:

- 459 Pilares;
- 622 Vigas (meio vão);
- 26 lajes maciças.

A análise foi feita sempre seguindo a seguinte ordem de métodos:

1. Métodos Tabelados;
2. Método simplificado da Isotérmica dos 500°C;
3. Método simplificado das Zonas.

Sempre que um dos métodos verificasse a secção não se procedeu à verificação pelos métodos seguintes. Todos os resultados podem ser encontrados nas tabelas disponibilizadas no Anexo A4 onde se podem encontrar as características das secções e os dados e resultados da sua verificação.

No seguimento do capítulo é feita a análise de alguns elementos da estrutura.

6.2. VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS DA ESTRUTURA

6.2.1. VERIFICAÇÃO DO RSCIE

O edifício apresenta dois tipos de utilização tipo distintos, sendo que nos pisos inferiores ao plano de referência se encontra a Utilização tipo II, de estacionamento, e nos pisos acima do plano de referência se considera utilização tipo I, de habitação.

Segundo o Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RSCIE) para a utilização tipo I é considerada a categoria de risco 2 (altura do edifício superior a 9 metros e inferior a 28, e nenhum piso abaixo do plano de referência) sendo exigido aos elementos estruturais um tempo mínimo de resistência ao fogo de 60 minutos. Para a utilização tipo II é considerada a categoria de risco 2 (com altura da UT 2 inferior a 9 metros, área bruta ocupada inferior a 3200m² e dois pisos abaixo do plano de referência) sendo exigido a elementos estruturais um tempo mínimo de resistência ao fogo de 90 minutos.

6.2.2. CÁLCULOS

Como já foi referido, a verificação da resistência, usando o programa de cálculo desenvolvido, foi aplicada para toda a estrutura e remetidos os seus valores para Anexo. No seguimento do capítulo irá ser feita a análise dos seguintes elementos:

- 1 Viga contínua;
- 2 pilares;
- 1 laje.

Esta análise vai ser feita pelo programa de cálculo, apresentando-se alguns resultados intermédios que não são mostrados na saída de resultados do programa. Os programas estão preparados para fazer o cálculo das resistências a frio e obter o efeito das acções em incêndio. Desta forma considera-se que as acções a frio e a quente estão sempre a solicitar o elemento para o esforço resistente máximo.

6.2.2.1. Vigas

A viga em estudo tem uma secção com largura de 30 centímetros e uma altura de 60 centímetros, as armaduras inferiores são constituídas por dois varões de canto de diâmetro 16 e dois com diâmetro 20 e dois varões de 16 nas armaduras superiores, como apresentado na Figura 6.2.

A viga apresentava ainda as seguintes características:

- recobrimento = 25 mm
- estribos = $\phi 6//.15$
- vão = 6.7 m
- largura de influência = 8 m

Quadro 6.2 – Temperaturas e coeficientes redutores para a armadura inferior.

Diâmetros (ϕ)	Temperatura (°C)	K_s
16	500	0,78
20	320	1

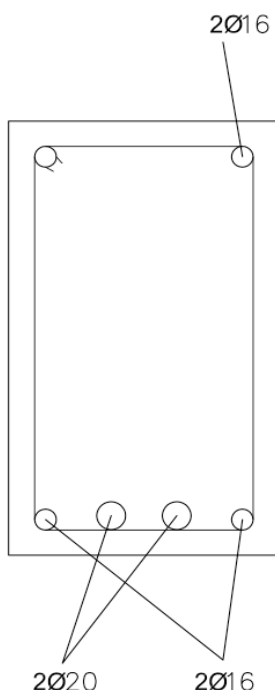


Figura 6.2 – Viga em estudo.

No cálculo do Método das Zonas foram consideradas 3 zonas, com as temperaturas para cada uma representadas no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Temperaturas medias e coeficientes redutores das secções de betão.

Secção	Temperatura (°C)	K_c
1	600	0,45
2	150	0,975
3	70	1

Pode-se verificar que em ambos os casos a resistência da secção ao fogo ($M_{rd,fi}$) será bastante superior as acções em caso de fogo ($M_{ed,fi}$). No caso do Métodos tabelados foi também testado tendo cumprido a distância mínima da face ao eixo do varão (caso pior).

Quadro 6.4 – Resultados obtidos para viga com momentos positivos.

Método	x_{rd} (m)	M_{rd} (KN.m)	η_{fi}	$M_{rd,fi}$ (KN.m)	$M_{ed,fi}$ (KN.m)	$x_{rd,fi}$ (m)	Ext. Sup. (m)	Ext. Inf. (m)
Isotérmica $a_{500}=22$	0,055	190,5	0,527	201,1	100,5	0,042	0,00026	0,04297
Zonas $a_z=36,84$	0,055	190,5	0,527	200,6	100,5	0,048	0,00064	0,03759

Quadro 6.5 – Resultados do Método Tabelado.

a	b	a _{min}	b _{min}
0,039	0,3	0,025	0,3

Podemos verificar que no cálculo da secção reduzida, ao contrário do que a regulamentação diz, o método da isotérmica apresenta valores menos conservativos que o das Zonas. Os resultados no entanto são bastante próximos, mas para o caso do momento considerado ser negativo, teríamos diferenças um bocado maiores. Em todos os métodos verificamos que a resistência da viga é cumprida por uma grande margem.

6.2.2.2. Pilares

No caso dos pilares, as suas características são apresentadas pelo quadro seguinte. É sempre considerado que as armaduras de canto são as armaduras da secção que apresentem maior diâmetro.

Quadro 6.6 – Características do pilares.

Pilar	b (m)	h (m)	Rec (cm)	A _s	Estribos	l (m)	A _{inf} (m ²)	Nível de carga
P1	0,4	0,4	2,5	12φ25	φ8//0,3	3	48	0,7
P2	0,4	0,4	2,5	4φ25+8φ20	φ8//0,24	3	48	0,65

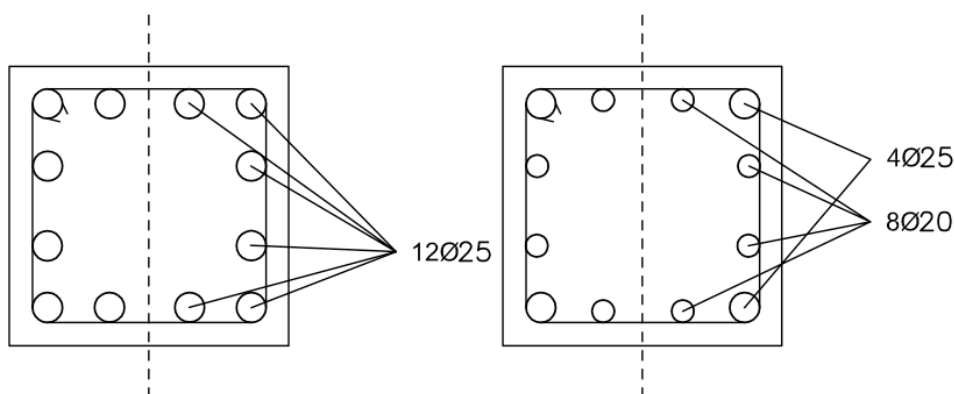


Figura 6.3 – Pilares em estudo

Embora os dois pilares apresentem armaduras distintas, a sua distribuição na secção será idêntica, tendo apenas a diferença na distância do eixo das armaduras à face, que irá variar em função do diâmetro dos varões. No quadro seguinte são enumeradas as temperaturas de cada armadura de cada pilar, sendo que as quatro primeiras são as armaduras de canto.

Quadro 6.7 – Temperatura das armaduras por pilar.

Temperatura °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P1	470	470	470	470	290	290	290	290	290	290	290	290
P2	470	470	470	470	300	300	300	300	300	300	300	300

Refira-se que estas temperaturas foram lidas com recurso aos perfis de temperatura apresentados em Anexo, e que tal foi feito para as secções que se verificaram com os métodos simplificados (pilares, vigas e lajes) num total de 1107.

Quadro 6.8 – Resultados para caso de pilares.

	x_{rd} (m)	M_{rd} (KN.m)	N (KN)	η_{fi}	$M_{rd,fi}$ (KN.m)	$M_{ed,fi}$ (KN.m)	$N_{rd,fi}$ (KN)	$N_{ed,fi}$ (KN)	$x_{rd,fi}$ (m)	Ext. Sup. (m)	Ext. Inf. (m)
Isotérmica P1($a_{500}=50$)	0,35	429	1867	0,71	446	304	1404	1324	0,29	0,00295	0,000769
Zonas P1($a_z=58,36$)	0,35	429	1867	0,71	451	304	1575	1324	0,3	0,00297	0,00059
Isotérmica P2($a_{500}=50$)	0,33	361	1733	0,71	367	255	1304	1225	0,26	0,00288	0,00129
Zonas P1($a_z=58,36$)	0,33	361	1733	0,71	344	255	1462	1255	0,27	0,00299	0,00107

Podemos ainda mais uma vez observar que resultados para o método das Zonas apresenta valores mais conservativos, indo contra o que seria de esperar pelo que o eurocódigo diz.

6.2.2.3. Lajes

A Laje em estudo apresenta as seguintes características:

- $h = 0,3$ m
- $A_s = \phi 12/0,14$
- recobrimento = 25 mm
- vão = 6.7 m
- largura de influência = 8 m

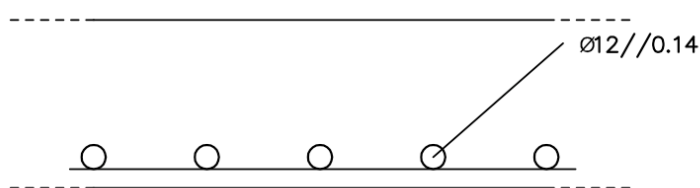


Figura 6.4 – Laje em estudo

Quadro 6.9 – Resultados obtidos para Lajes em momentos positivos.

Método	x_{rd} (m)	M_{rd} (KN.m)	η_{fi}	$M_{rd,fi}$ (KN.m)	$M_{ed,fi}$ (KN.m)	$x_{rd,fi}$ (m)	Ext. Sup. (m)	Ext. Inf. (m)
Isotérmica $a_{500}=22$	0,021	71,8	0,175	83,18	12,54	0,015	0,01533	0,05596
Zonas $a_z=49,33$	0,021	71,8	0,175	83,18	12,54	0,015	0,01533	0,05596

Pelos resultados obtidos pode-se verificar que mais uma vez o método das Zonas foi mais conservativo que o da Isotérmica, isto pode constatar-se pelo valor da secção reduzida. No entanto a redução da secção é feita na parte inferior originando resultados idênticos de resistência.

6.3. CONCLUSÕES

Pelo que se pode constatar pelos resultados obtidos (Quadros completos no Anexo A4), a estrutura não verifica completamente a acção do fogo.

No caso das lajes, apenas se pode fazer a verificação para as lajes maciças. Em todas elas é cumprida a resistência requerida. As restantes lajes são aligeiradas, mas por existirem erros no projecto não foi permitido obter as suas características.

Para vigas em todo o projecto apenas 5 vigas não cumpriram a resistência requerida. Analisando estes casos pode-se constatar que em todos eles é necessária uma resistência de 90 minutos visto estarem inseridas na garagem. Pode-se também verificar que a largura das secções são muito baixas ($b=0,2m$) para os 5 casos.

No caso de pilares foram encontrados 4 casos que não cumpriam a resistência. Pode-se explicar da mesma forma por estes apresentarem secções baixas ($A_c=0,3*0,4 m^2$). Em 5 casos foram encontrados níveis de carga bastante elevados, é de relembrar que o programa apenas funciona para um limite de nível de carga de 0,8. No entanto foram encontrados níveis de carga a frio, superiores a 1 o que leva a crer que podem ser erros de dimensionamento à temperatura ambiente.

Conclui-se também que em quase todos os casos em que se necessitou de usar o método das zonas, este se apresentou mais conservador do que o método da Isotérmica, o autor pensa que isto se pode explicar pelas baixas temperaturas nas secções que se pretendiam verificar.

Para que a estrutura verifique condições de segurança em situação de incêndio deverão ser analisados

os casos onde esta não é verificada, corrigindo a disposição de armaduras ou as dimensões do pilar.

Note-se que a segurança à temperatura ambiente também deverá ser satisfeita, logo a correcção da posição e da quantidade de armaduras deverá ter em consideração esta exigência.

7

CONCLUSÕES E IMPLICAÇÕES NA PRÁTICA DE PROJECTO

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

Durante a realização desta dissertação chegou-se à conclusão que a acção do fogo é vista de um modo demasiado simplificado em relação à sua complexidade. Mesmo a definição de fogo regulamentar é tida com alguns erros, não se considerando a fase inicial nem a fase de arrefecimento, o que irá trazer erros na análise real estrutural.

Por outro lado as reduções das características das acções são também feitas de um modo muito simplificado. O betão é um material que apresenta um bom comportamento ao fogo, na maioria dos casos o núcleo das secções nunca irá atingir temperaturas que o afectem, no entanto o betão sendo um material muito heterogéneo não é caracterizado completamente.

Estes erros vão afectar principalmente a criação de perfis de temperatura das secções, que são uma das partes essenciais do estudo estrutural da acção do fogo; mesmo com estes perfis de temperatura bem definidos será muito fácil errar no cálculo estrutural visto que o mau posicionamento das armaduras em um centímetro poderá criar um diferencial térmico na ordem das centenas de graus. Além disso, a regulamentação em vigor apresenta um número insuficiente de perfis de temperatura, o que levará muitas vezes os projectistas a usarem aproximações no estudo de uma estrutura.

Outro dos defeitos da regulamentação é permitir um estudo isolado dos elementos, ao ponto de uma verificação das secções ser o suficiente para que a resistência ao fogo se verifique. O autor considera que esta simplificação será bastante prejudicial pelo facto de as acções térmicas provocarem dilatações na estrutura, devendo analisar-se esse efeito para a estrutura global, assim como ter em consideração o efeito do “spalling”.

Em relação aos Métodos Tabelados pode-se concluir, pela análise estrutural feita, que são bastante conservativos. Por outro lado num estudo real, a consideração destes métodos pode ter grandes erros pelo simples facto de ser feita uma verificação ao eixo das armaduras para projecto, mas que em obra a aplicação dos recobrimentos nem sempre é feita de uma maneira correcta, nem é de fácil controlo. No caso de flexões desviadas em pilares, caso não considerado no Eurocódigo, o autor conclui que os métodos tabelados, para pilares do projecto, é possível usar em flexão desviada, pois na análise feita na estrutura, conclui-se que os valores apresentados apenas eram afectados pelo nível de carga, sendo que o momento aplicado nunca influencia a verificação do elemento.

No caso dos métodos simplificados as duas metodologias são muito semelhantes, sendo a única diferença no modo como se chega à secção reduzida do betão. A regulamentação considera o Método

das Zonas como sendo o mais preciso e menos conservativo porque entra em consideração com as temperaturas de toda a secção de betão. Na opinião do autor isto nem sempre é verdade, visto estas temperaturas serem consideradas em função da temperatura média das várias secções que nem sempre são bem definidas e que podem ser consideradas de várias maneiras por quem utilizar os métodos. Por esse motivo considera-se que a utilização do método da Isotérmica é muito mais vantajoso em prática de projecto por levar a menos erros.

Os Eurocódigos também negligenciam o estudo de estruturas por apenas apresentarem os métodos de redução das secções e características do aço e não apresentarem as metodologias de cálculo para as secções em função das cargas. O principal erro de omissão refere-se a flexão desviada, pelo simples facto de a frio o seu cálculo ser feito com recurso a tabelas onde a aplicação de secções reduzidas e reduções de características do aço não são possíveis. Conclui-se também que o método desenvolvido para estas acções apresentam resultados conservativos, mas como as acções e as resistências, em incêndio, são as duas calculadas pelo mesmo método, irá ter-se resultados de verificação bastante realistas.

Além disso a regulamentação para o dimensionamento a frio, deveria ter em maior consideração a acção do fogo tendo-se como exemplo que um diferente posicionamento das armaduras nos cantos das secções ou uma maior distribuição por vários níveis de armadura iria beneficiar muito a estrutura em caso de incêndio.

Com a aplicação do programa desenvolvido ao projecto existente pôde-se concluir que este programa veio trazer grandes vantagens na verificação das secções das estruturas. O programa permite que se faça uma verificação das secções sem que se tenha que fazer qualquer cálculo. É no entanto recomendado que para a utilização do programa, em projectos de grandes dimensões, se utilize como complemento um programa que crie perfis de temperatura ou a utilização de listas de perfis mais extensas que os apresentados pelo Eurocódigo.

7.2. TRABALHO FUTURO

O programa desenvolvido durante esta dissertação traz grandes vantagens e torna a verificação ao fogo pelos Métodos Tabelados e Simplificados num processo bastante fácil e rápido. No entanto, o programa pode ser ainda melhorado.

Em termos de funcionalidades seria muito vantajoso que o programa pudesse importar as características das secções de ficheiros (por exemplo um ficheiro excel) para que não seja necessário o cálculo secção a secção.

Os métodos simplificados ainda estão muito dependentes da obtenção de temperaturas através de perfis que o utilizador terá que arranjar ou consultar nas normas. Poderia ser integrado ou criado um programa de criação de perfis afim de acelerar o processo de verificação e diminuir os erros que se possam criar com a utilização de perfis mal implementados e da falta de precisão dos utilizadores.

Outras das melhorias, e de muito mais fácil aplicação que as restantes, seria o de ter em atenção para o cálculo dos momentos resistentes as extensões e estado de tensão das armaduras, de maneira a terem-se resultados da resistência mais precisos. Seria também bom alargar os métodos já desenvolvidos a tipos de secção diferentes das quadradas e rectangulares.

Além dos métodos já em utilização do programa, deverá ser feita uma futura implantação dos métodos SimFirb e SimFirc, desenvolvidos pelo Professor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues Gonçalves, por

serem métodos simplificados com uma precisão de cálculo que se aproxima muito dos métodos avançados.

Num trabalho futuro poderão também ser implementadas algumas informações relacionadas com o RJ-SCIE e RT-SCIE de maneira a poder-se calcular o tempo resistente a aplicar.

Por fim deve recorrer-se a estudos de casos reais e estudo de secções ou elementos em laboratório, de maneira a poder-se validar os métodos já existentes e desenvolver métodos simplificados mais precisos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Verificação de resistência ao fogo*, LNEC, 2010.
- [2] Gonçalves, Tiago, *Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão – Comportamento Global de Estruturas em Situação de Incêndio*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Eng. Civil, Lisboa, IST.
- [3] *Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções em estruturas expostas ao fogo*, LNEC, 2010.
- [4] Gonçalves, Miguel, *Comportamento ao Fogo de Elementos Estruturais de Betão Análise Numérica e Metodologia*. Tese de Doutoramento em Eng. Civil, Porto, FEUP.
- [5] Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios - Decreto-Lei nº 220/2008, 12 de Novembro.
- [6] Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios - Portaria nº 1532/2008, 29 de Dezembro.
- [7] *Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-1: Acções gerais*, LNEC, 2009.
- [8] I.Cabrita Neves; J. Brito, *Avaliação e Reparação de Estruturas de Betão Danificadas pelo Fogo*, IST, 1997.
- [9] *Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, LNEC, 2010.
- [10] *Eurocódigo 0 – Bases para o projecto de estruturas*, LNEC, 2009.
- [11] J.D'Arga ; V.Monteiro; Mary Mun, *Betão Armado – Esforços Normais e de Flexão(REBAP-83)*, LNEC, Lisboa, 1985.
- [12] *REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*, Decreto-Lei nº349-C/83 de 30 de Junho, Lisboa, 1983
- [13]Especificações do LNEC E 464:2005 – “*Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projectos de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*”

ANEXOS

A1

TABELAS DO MÉTODO C

Neste Anexo são apresentados os quadros do Anexo C do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], e que são mencionados no Capítulo 3 da presente dissertação (Quadro 3.7).

Quadro A1.1 – C.2 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,1$.
Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,25b$ com $e \leq 100\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm] Largura b_{\min} , distância ao eixo a Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	300/30:350/25*
	40	150/25*	150/30:200/25*	300/25*	500/40:550/25*
	50	150/25*	200/40:250/25*	350/40:500/25*	550/25*
	60	150/25*	300/25*	550/25*	600/30*
	70	200/25*	350/40:500/25*	550/30:600/25*	(1)
	80	250/25*	550/25*	(1)	(1)
R60	30	150/30:200/25*	200/40:300/25*	300/40:550/25*	500/25*
	40	200/30:250/25*	300/35:350/25*	450/50:550/25*	550/40:600/25*
	50	200/40:300/25*	350/45:550/25	550/30:600/30*	600/55*
	60	250/35:400/25*	450/50:550/25*	600/35*	(1)
	70	300/40:500/25	550/30:600/25*	600/80*	(1)
	80	400/40:550/25*	600/30*	(1)	(1)
R90	30	200/40:250/25*	300/40:400/25*	500/50:550/25*	550/40:600/25*
	40	250/40:350/25*	350/50:550/25*	550/35:600/25*	600/50
	50	300/40:500/25*	500/60:550/25*	600/40*	(1)
	60	300/50:550/25*	550/45:600/25*	(1)	(1)
	70	400/50:550/25*	600/45*	(1)	(1)
	80	500/60:600/25*	(1)	(1)	(1)
R120	30	250/50:350/25*	400/50:550/25*	550/25*	550/60:600/45
	40	300/50:500/25*	500/50:550/25*	550/50:600/25*	(1)
	50	400/50:550/25*	550/50:600/25*	600/60*	(1)
	60	500/50:550/25*	550/55:600/50*	(1)	(1)
	70	500/60:600/25*	600/60*	(1)	(1)
	80	550/50:600/25*	(1)	(1)	(1)
R180	30	400/50:500/25*	500/60:550/25*	550/60:600/30*	(1)
	40	500/50:550/25*	550/50:600/25*	600/80*	(1)
	50	550/25*	600/60*	(1)	(1)
	60	550/50:600/25*	600/80*	(1)	(1)
	70	600/55*	(1)	(1)	(1)
	80	600/70*	(1)	(1)	(1)
R240	30	500/60:550/25*	550/40:600/25*	600/75*	(1)
	40	550/25*	600/60*	(1)	(1)
	50	550/60:600/25*	600/80*	(1)	(1)
	60	600/60*	(1)	(1)	(1)
	70	600/80*	(1)	(1)	(1)
	80	(1)	(1)	(1)	(1)

Quadro A1.2 – C.3 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,1$.

Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,5b$ com $e \leq 200\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm]			
		Largura b_{\min} , distância ao eixo a			
		Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	400/40:550/25*	550/25*	(1)
	40	200/25*	550/25*	550/35:600/30*	(1)
	50	250/30:300/25*	550/30:600/25*	(1)	(1)
	60	300/40:550/25*	600/50*	(1)	(1)
	70	400/40:550/25*	(1)	(1)	(1)
	80	550/25*	(1)	(1)	(1)
R60	30	300/35:500/25*	500/50:550/25*	550/50:600/40	(1)
	40	350/40:550/25*	550/40:600/30*	(1)	(1)
	50	450/50:550/25*	550/50:600/40*	(1)	(1)
	60	550/30*	600/80*	(1)	(1)
	70	550/35	(1)	(1)	(1)
	80	550/40*	(1)	(1)	(1)
R90	30	350/50:550/25*	550/45:600/40*	600/80*	(1)
	40	500/60:600/30*	550/60:600/60*	(1)	(1)
	50	550/40*	600/80*	(1)	(1)
	60	550/50:600/45*	(1)	(1)	(1)
	70	550/60:600/50*	(1)	(1)	(1)
	80	600/70*	(1)	(1)	(1)
R120	30	550/40:600/30*	550/50*	(1)	(1)
	40	550/50:600/45*	600/70*	(1)	(1)
	50	550/55:600/50*	(1)	(1)	(1)
	60	550/60:600/50*	(1)	(1)	(1)
	70	600/70*	(1)	(1)	(1)
	80	(1)	(1)	(1)	(1)
R180	30	550/50*	600/80*	(1)	(1)
	40	550/60*	(1)	(1)	(1)
	50	600/70*	(1)	(1)	(1)
	60	(1)	(1)	(1)	(1)
	70	(1)	(1)	(1)	(1)
	80	(1)	(1)	(1)	(1)
R240	30	600/70*	(1)	(1)	(1)
	40	(1)	(1)	(1)	(1)
	50	(1)	(1)	(1)	(1)
	60	(1)	(1)	(1)	(1)
	70	(1)	(1)	(1)	(1)
	80	(1)	(1)	(1)	(1)

Quadro A1.3 – C.4 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,5$.
Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,025b$ com $e \geq 10\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm]			
		Largura b_{\min} , distância ao eixo a			
		Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	40	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	50	150/25*	150/25*	150/25*	200/25*
	60	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/25*
	70	150/25*	150/25*	200/25*	250/25*
	80	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	300/25*
R60	30	150/25*	150/25*	150/30:200/25*	250/35:250/25*
	40	150/25*	150/25*	200/25*	250/30:300/25*
	50	150/25*	150/35:250/25	200/40:250/25*	250/40:350/25*
	60	150/25*	200/30:250/25*	250/30:300/25*	300/40:450/25*
	70	150/25*	200/35:250/25*	250/40:350/25*	350/45:600/25*
	80	150/35:200/25*	250/30:300/25*	300/40:500/25*	450/50:600/35*
R90	30	150/25*	150/40:200/25*	200/40:250/25*	250/40:300/25*
	40	150/25*	200/35:250/25*	250/30:300/25*	300/40:400/25*
	50	150/40:200/25*	200/45:250/25*	250/45:350/25*	350/45:550/25*
	60	200/25*	250/35:300/25*	300/45:400/25*	400/50:600/35*
	70	200/35:250/25*	250/45:350/25*	350/45:600/25*	550/50:600/45*
	80	200/45:250/25*	250/50:400/25*	400/50:600/35*	600/60*
R120	30	150/35:200/25*	200/40:250/25*	250/45:300/25*	350/45:500/25*
	40	200/25*	250/25*	300/45:350/25*	400/50:550/25*
	50	200/40:250/25*	250/45:300/25*	350/45:450/25*	450/50:600/25*
	60	200/50:250/25*	300/45:350/25*	400/50:550/25*	500/60:600/35*
	70	250/35:300/25*	350/45:450/25*	500/50:600/40*	600/45*
	80	250/45:300/25*	400/50:550/25	50/60:600/45*	600/60*
R180	30	200/45:250/25*	250/35:300/25*	350/45:400/25*	450/45:500/25*
	40	250/25*	300/45:350/25*	450/25*	500/55:600/50*
	50	250/35:300/25*	350/45:400/25*	500/40:550/25*	600/65*
	60	300/40:350/25*	450/25*	500/60:600/55*	600/80*
	70	350/25*	500/40:550/45*	600/65*	(1)
	80	400/30:450/25*	500/55:600/45	600/80	(1)
R240	30	250/25*	350/25*	450/45:500/25*	550/65:600/50*
	40	250/40:300/25*	400/45:450/25*	500/60:550/25*	600/75*
	50	350/30:400/25*	450/50:500/25*	550/70:600/55	(1)
	60	400/35:450/35*	500/50:600/25*	600/75	(1)
	70	450/30:500/25*	550/75:600/50*	(1)	(1)
	80	500/40:550/25*	600/70*	(1)	(1)

Quadro A1.4 – C.5 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,5$.

Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,25b$ com $e \leq 100\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm]			
		Largura b_{\min} , distância ao eixo a			
		Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/25*
	40	150/25*	150/25*	150/25*	300/45:350/25*
	50	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	350/40:450/25*
	60	150/25*	150/25*	250/30:300/25*	500/30:550/25*
	70	150/25*	150/35:200/25*	350/30:400/25*	550/35:600/30*
	80	150/25*	200/30:250/25*	400/40:500/25*	600/50*
R60	30	150/25*	150/35:200/25*	250/35:350/25*	350/40:550/25*
	40	150/25*	200/30:300/25*	300/35:500/25*	450/40:600/30*
	50	150/30:200/25*	200/40:350/25*	300/45:550/25*	500/50:600/35*
	60	150/35:200/25*	250/40:500/25*	400/45:600/30*	600/45*
	70	200/30:300/25*	300/40:500/25*	500/40:600/35*	600/80*
	80	200/35:300/25*	350/40:600/25*	550/55:600/40*	(1)
R90	30	150/35:200/25*	200/45:300/25*	300/45:550/25*	500/50:600/40*
	40	200/35:250/25*	250/45:500/25*	350/50:600/25*	550/50:600/45*
	50	200/40:300/25*	300/45:550/25*	500/50:600/35*	600/55*
	60	200/50:400/25*	350/50:600/25*	550/50:600/45	(1)
	70	300/35:500/25*	400/50:600/35*	600/50*	(1)
	80	300/40:600/25*	500/55:600/40*	600/80*	(1)
R120	30	200/45:300/25*	300/45:550/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50
	40	200/50:350/25*	350/50:550/25*	500/50:600/40*	600/55*
	50	250/45:450/25*	450/50:600/25*	500/55:550/45*	600/80*
	60	300/50:500/25*	500/45:600/40*	550/60:600/60*	(1)
	70	350/50:550/25*	500/50:550/45*	600/75*	(1)
	80	400/50:600/25*	500/55:550/50*	(1)	(1)
R180	30	300/45:450/25*	450/50:600/25*	500/60:600/50*	600/75*
	40	350/50:500/25*	500/50:600/25*	600/60*	(1)
	50	450/50:500/25*	500/60:600/50*	600/70*	(1)
	60	500/50:600/25*	550/60:600/55*	(1)	(1)
	70	500/55:600/35*	600/65*	(1)	(1)
	80	500/60:600/55*	600/75*	(1)	(1)
R240	30	450/45:500/25*	550/55:600/25*	600/70*	(1)
	40	450/50:550/25*	600/50*	600/80*	(1)
	50	500/55:600/25*	600/65*	(1)	(1)
	60	550/55:600/40*	600/75*	(1)	(1)
	70	600/60*	(1)	(1)	(1)
	80	600/70*	(1)	(1)	(1)

Quadro A1.5 – C.6 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=0,5$.

Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,5b$ com $e \leq 200\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm]			
		Largura b_{\min} , distância ao eixo a			
		Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	250/35:300/25*	500/40:550/25*
	40	150/25*	150/30:200/25*	300/35:450/25*	550/30*
	50	150/25*	200/30:250/25*	400/40:500/25*	550/50:600/40*
	60	150/25*	200/35:300/25*	450/50:550/25*	(1)
	70	150/25*	250/40:400/25*	500/40:600/30*	(1)
	80	150/25*	300/40:500/25*	550/50:600/40	(1)
R60	30	150/30:200/25*	200/40:450/25*	450/50:550/30*	550/50:600/40*
	40	150/35:250/25*	250/40:500/25*	500/40:550/35*	600/60*
	50	200/35:300/25*	300/45:550/25	500/55:550/40*	(1)
	60	200/40:500/25*	400/40:600/30*	550/50:600/45*	(1)
	70	200/40:550/25	500/40:550/35*	600/60*	(1)
	80	250/40:600/25*	500/45:600/35*	(1)	(1)
R90	30	250/40:450/25*	300/50:500/25*	500/55:600/40*	600/80*
	40	200/50:500/25*	350/50:550/35*	550/60:600/50*	(1)
	50	250/45:550/25*	500/45:550/40*	600/60*	(1)
	60	250/50:550/30*	500/50:550/45*	600/80*	(1)
	70	300/50:550/35*	550/50:600/45*	(1)	(1)
	80	350/50:600/35*	550/60:600/50	(1)	(1)
R120	30	250/50:550/25*	500/50:550/40*	550/50*	(1)
	40	300/50:600/25*	500/55:550/45*	550/60:600/55*	(1)
	50	400/50:550/35*	500/60:600/45*	600/80*	(1)
	60	450/50:600/40*	550/50*	(1)	(1)
	70	500/50:550/45*	550/60:600/55*	(1)	(1)
	80	550/50:600/45*	600/70*	(1)	(1)
R180	30	500/45:550/30*	550/55*	600/75*	(1)
	40	500/50:600/40*	550/60*	(1)	(1)
	50	500/60:550/50*	600/70*	(1)	(1)
	60	550/55*	600/75*	(1)	(1)
	70	550/60*	(1)	(1)	(1)
	80	600/60*	(1)	(1)	(1)
R240	30	550/50:600/45*	600/70*	(1)	(1)
	40	550/60:600/55*	600/75*	(1)	(1)
	50	600/65*	(1)	(1)	(1)
	60	600/70*	(1)	(1)	(1)
	70	600/75*	(1)	(1)	(1)
	80	600/80*	(1)	(1)	(1)

Quadro A1.6 – C.7 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=1$.

Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,025b$ com $e \geq 10\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm]			
		Largura b_{\min} , distância ao eixo a			
		Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	40	150/25*	150/25*	150/25*	150/25*
	50	150/25*	150/25*	150/25*	150/30:200/25*
	60	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:250/25*
	70	150/25*	150/25*	150/30:200/25*	250/25*
	80	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	250/30:300/25*
R60	30	150/25*	150/25*	150/25*	200/40:300/25*
	40	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	250/35:350/25*
	50	150/25*	150/30:200/25	200/40:250/25*	250/40:350/25*
	60	150/25*	150/40:250/25*	250/35:300/25*	300/40:600/25*
	70	150/25*	200/35:250/25*	300/40:400/25*	350/40:450/35*
	80	150/30:200/25*	200/40:300/25*	300/40:550/25*	350/45:450/40*
R90	30	150/25*	200/25*	200/40:250/25*	250/45:600/25*
	40	150/25*	200/35:250/25*	250/35:350/25*	300/45:600/30*
	50	150/35:200/25*	200/40:250/25*	250/45:400/25*	350/45:600/35*
	60	150/40:250/25*	250/55:300/25*	300/45:550/25*	400/50:600/40*
	70	200/35:250/25*	300/35:350/25*	350/45:600/35*	550/50:600/45*
	80	200/40:250/25*	300/40:500/25*	350/50:600/40*	550/65:600/55*
R120	30	150/40:200/25*	200/45:250/25*	250/40:400/25*	400/40:600/25*
	40	200/30:250/25*	250/25*	300/45:400/25*	400/50:600/30*
	50	200/40:250/25*	250/35:300/25*	350/40:550/25*	550/45:600/40*
	60	200/45:250/25*	250/45:400/25*	400/50:600/25*	550/60:600/50*
	70	250/25*	350/35:450/25*	550/40:600/35*	600/70*
	80	250/35:300/25*	350/40:550/25*	550/50:600/45*	(1)
R180	30	200/50:250/25*	300/25*	350/45:450/25*	500/50:600/45*
	40	250/25*	300/45:350/25*	450/45:550/25*	550/60:600/55
	50	250/30:300/25*	350/40:450/25*	450/50:600/40*	600/70*
	60	250/40:350/25*	350/40:500/25*	550/55:600/50*	600/80*
	70	300/45:400/25*	450/45:600/35*	550/70:600/65*	(1)
	80	350/40:450/25*	550/50:600/40*	600/75*	(1)
R240	30	250/25*	350/40:400/25*	500/40:600/25*	550/70:600/60*
	40	250/40:350/25*	400/50:450/25*	500/60:600/40*	600/75*
	50	350/30:400/25*	450/45:550/25*	550/55:600/50*	(1)
	60	350/45:450/25*	500/50:600/35*	600/70*	(1)
	70	400/50:500/25*	500/60:600/45*	(1)	(1)
	80	450/45:550/25*	550/60:600/50*	(1)	(1)

Quadro A1.7 – C.8 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=1$.
Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,25b$ com $e \leq 100\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm]			
		Largura b_{\min} , distância ao eixo a			
		Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	150/25*	200/30:300/25*
	40	150/25*	150/25*	150/25*	250/30:450/25*
	50	150/25*	150/25*	200/25*	300/35:500/25*
	60	150/25*	150/25*	200/30:250/25*	400/40:550/25*
	70	150/25*	150/25*	250/35:300/25*	500/35:600/30*
	80	150/25*	150/30:250/25*	300/35:500/25*	500/60:600/35*
R60	30	150/25*	150/30:200/25*	200/40:400/25*	300/50:600/30*
	40	150/25*	150/40:250/25*	250/40:500/25*	400/50:600/35*
	50	150/25*	200/35:400/25	300/40:600/25*	500/45:600/40*
	60	150/30:200/25*	200/40:450/25*	400/40:600/30*	550/40:600/40*
	70	150/35:200/25*	240/40:550/25*	450/45:500/35*	600/60*
	80	200/30:250/25*	300/40:550/25*	500/50:600/40*	600/80*
R90	30	200/25*	200/40:300/25*	250/40:550/25*	550/50:600/45*
	40	200/30:250/25*	200/50:400/25*	300/50:600/35*	500/60:600/50*
	50	200/35:300/25*	250/50:550/25*	400/50:600/40*	600/55*
	60	200/40:400/25*	300/45:600/25*	500/50:600/45*	600/70*
	70	200/45:450/25*	300/50:600/35*	550/55:600/50*	(1)
	80	200/50:500/25*	400/50:600/35*	600/55*	(1)
R120	30	200/40:250/25*	250/50:400/25*	450/45:600/30*	600/60*
	40	200/45:300/25*	300/40:500/25*	500/50:600/35*	(1)
	50	250/40:400/25*	400/40:550/25*	550/50:600/45*	(1)
	60	250/50:450/25*	400/50:500/35*	600/55*	(1)
	70	300/40:500/25*	500/45:600/35*	(1)	(1)
	80	300/50:550/25*	500/60:600/40*	(1)	(1)
R180	30	300/35:400/25*	450/50:550/25*	500/60:600/45*	(1)
	40	300/40:450/25*	500/40:600/30*	550/65:600/60*	(1)
	50	400/40:500/25*	500/45:600/35*	600/75*	(1)
	60	400/45:550/25*	500/55:600/45*	(1)	(1)
	70	400/50:600/30*	500/65:600/50*	(1)	(1)
	80	500/45:600/35*	550/50:600/40*	(1)	(1)
R240	30	400/45:500/25*	500/40:600/30*	600/60*	(1)
	40	450/45:550/25*	500/55:600/40*	600/80*	(1)
	50	450/50:600/25*	500/65:600/45*	(1)	(1)
	60	500/45:600/35*	550/70:600/55*	(1)	(1)
	70	500/50:600/40*	600/75*	(1)	(1)
	80	500/60:600/45*	(1)	(1)	(1)

Quadro A1.8 – C.9 – Dimensões Mínimas das secções rectangulares e circulares dos pilares e distâncias mínimas das faces da secção sujeita a incêndio ao eixo das armaduras. Relação mecânica de armadura $\omega=1$.

Momento de primeira ordem baixo: ($e=0,5b$ com $e \leq 200\text{mm}$), [7].

Resistência ao Fogo	λ	Dimensões mínimas [mm]			
		Largura b_{\min} , distância ao eixo a			
		Pilares sujeitos a incêndio em mais que uma face			
		$n=0,15$	$n=0,3$	$n=0,5$	$n=0,7$
R30	30	150/25*	150/25*	200/30:300/25*	500/30:550/25*
	40	150/25*	150/25*	250/30:450/25*	500/40:600/30*
	50	150/25*	150/30:200/25*	300/35:500/25*	550/35*
	60	150/25*	200/30:250/25*	350/40:500/25*	550/50*
	70	150/25*	200/30:300/25*	450/50:550/25*	(1)
	80	150/25*	250/30:350/25*	500/35:600/30*	(1)
R60	30	150/25*	200/35:450/25*	350/40:600/30*	550/45:600/40*
	40	150/30:200/25*	200/40:500/25*	450/50:500/35*	600/60*
	50	150/35:250/25*	250/40:550/25*	500/40:600/35*	600/80*
	60	200/30:350/25*	300/40:600/25*	500/50:600/40*	(1)
	70	250/30:450/25*	350/40:600/30*	550/50:600/45*	(1)
	80	250/55:500/25*	450/40:500/35*	600/70*	(1)
R90	30	200/35:300/25*	250/50:550/25*	500/50:600/40*	600/70*
	40	200/40:450/25*	300/50:600/30*	500/55:600/45*	(1)
	50	200/45:500/25*	350/50:600/35*	550/50*	(1)
	60	200/50:550/25*	450/50:600/40*	600/60*	(1)
	70	250/45:600/30*	500/50:600/45*	600/80*	(1)
	80	250/50:500/35*	500/55:600/45*	(1)	(1)
R120	30	200/50:450/25*	450/45:600/25*	550/55:600/50*	(1)
	40	250/50:500/25*	500/40:600/30*	600/65*	(1)
	50	300/40:550/25*	500/50:600/35*	(1)	(1)
	60	350/45:550/25*	500/60:600/40*	(1)	(1)
	70	450/40:600/30*	550/60:600/50*	(1)	(1)
	80	450/45:600/30*	600/65*	(1)	(1)
R180	30	350/45:550/25*	500/45:600/40*	600/80*	(1)
	40	450/45:600/30*	500/60:600/45*	(1)	(1)
	50	450/50:600/35*	500/70:600/55*	(1)	(1)
	60	500/45:600/40*	550/70:600/65*	(1)	(1)
	70	500/50:600/40*	600/75*	(1)	(1)
	80	500/55:600/45*	(1)	(1)	(1)
R240	30	500/40:600/35*	550/55:600/50*	(1)	(1)
	40	500/50:600/40*	550/65:600/55*	(1)	(1)
	50	500/55:600/45*	600/70*	(1)	(1)
	60	500/60:600/45*	(1)	(1)	(1)
	70	500/70:600/50*	(1)	(1)	(1)
	80	550/60:600/55*	(1)	(1)	(1)

A2

PERFIS DE TEMPERATURA DO EUROCODIGO 2, PARTE 1-2

Neste Anexo vão ser apresentados os perfis de temperatura para pilares e vigas, retirados do Anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2 [1].

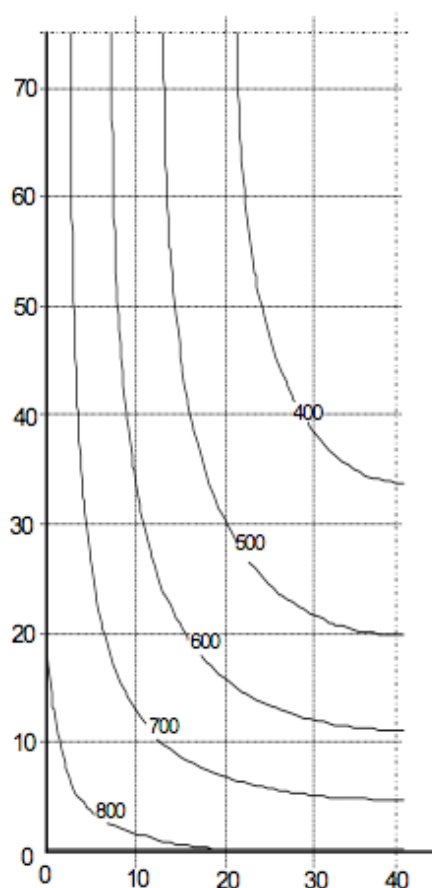


Fig.A2.1 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 150 \times 80$ – R 30

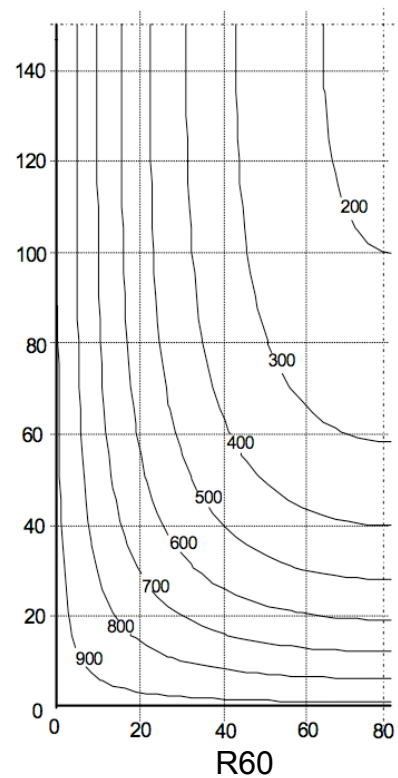
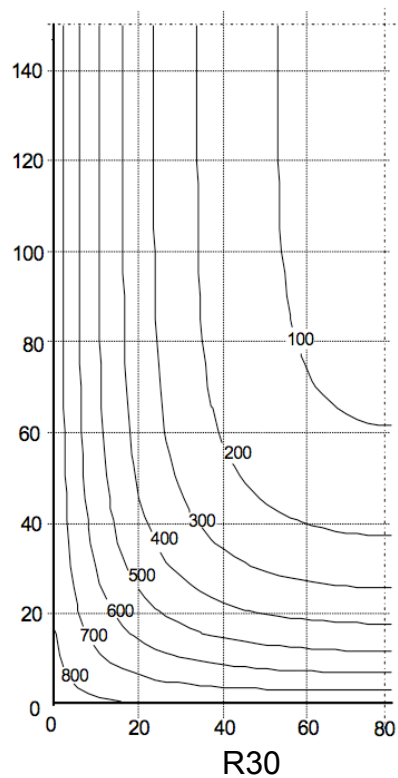


Fig.A2.2 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160$

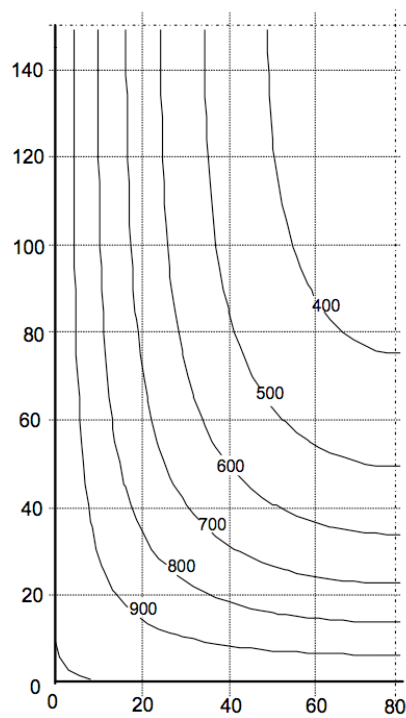


Fig.A2.3 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160$ – R90

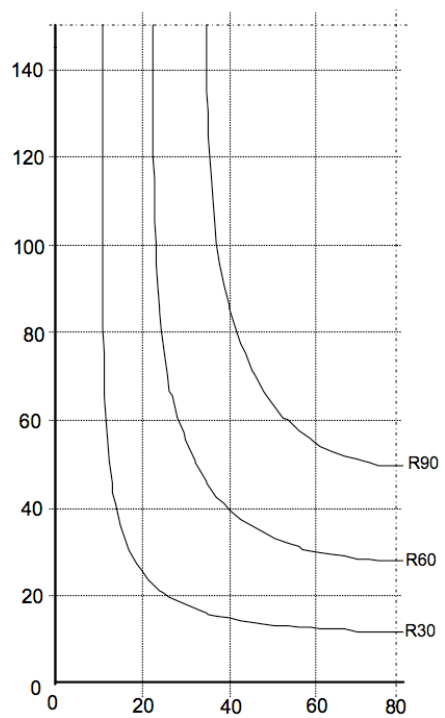


Fig.A2.4 – Isotérmica de 500°C para uma viga $h \times b = 300 \times 160$

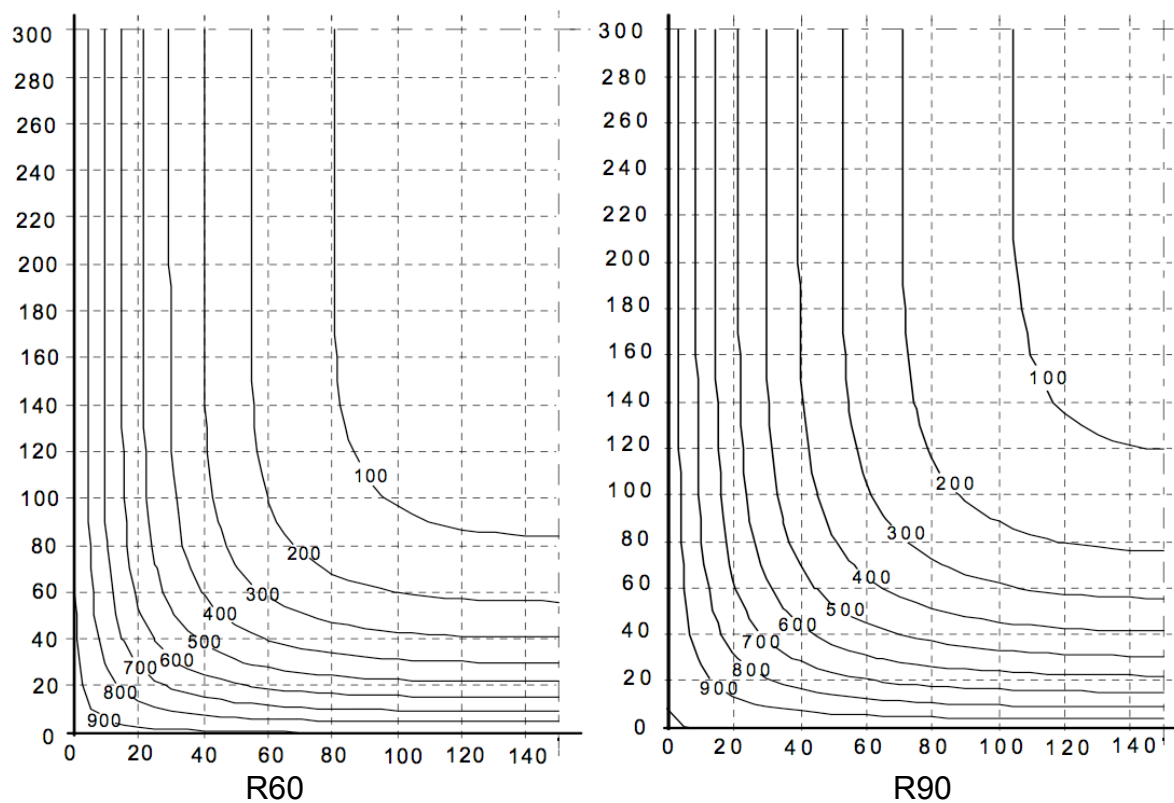


Fig.A2.5 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300$

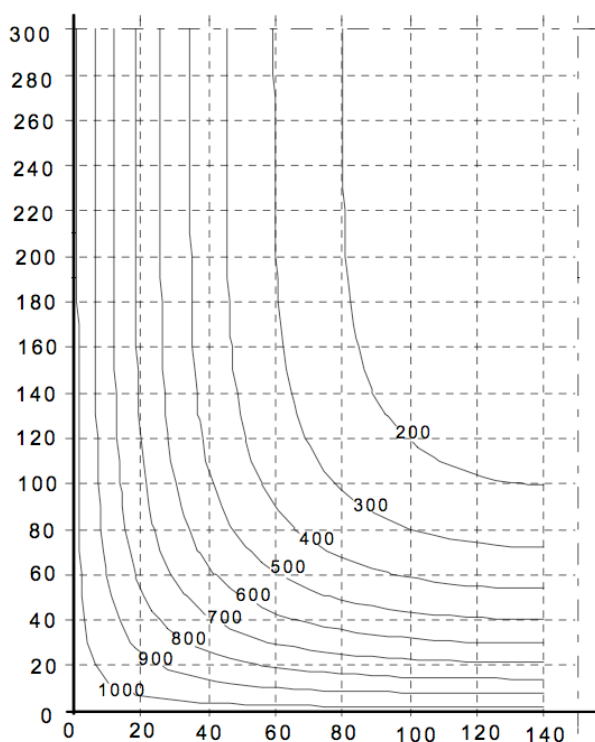
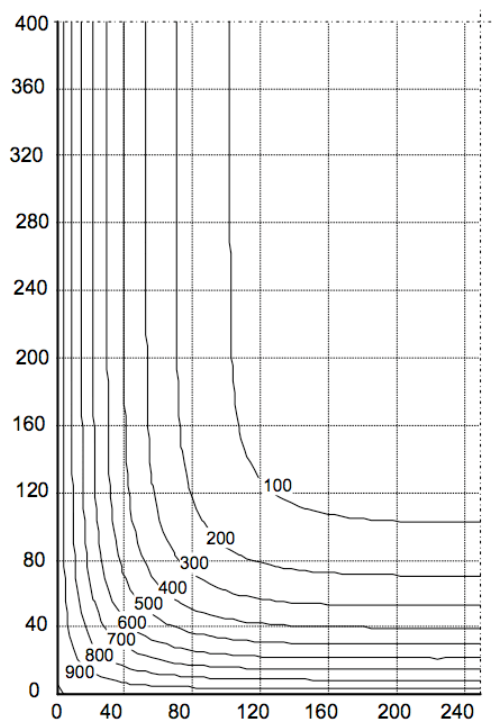
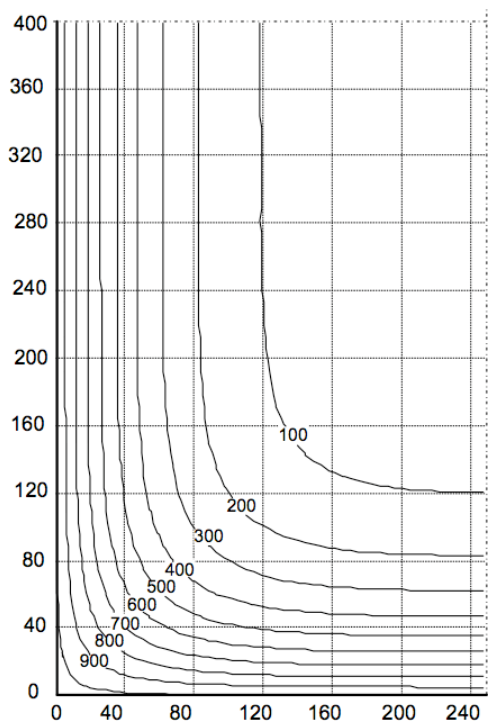


Fig.A2.6 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300 - R 120$

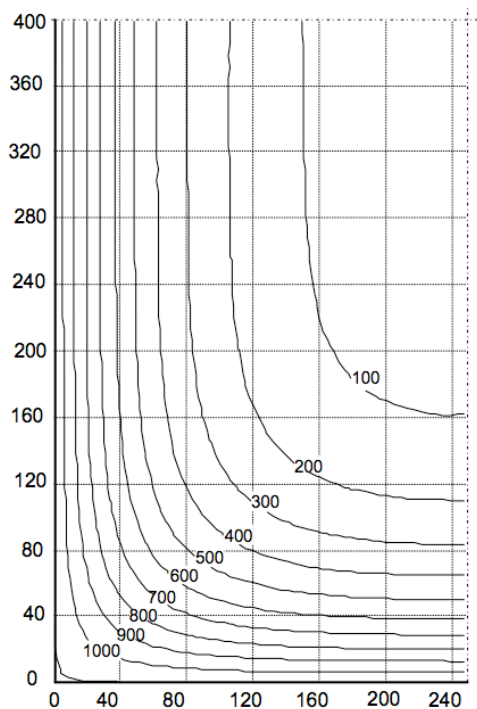


R60

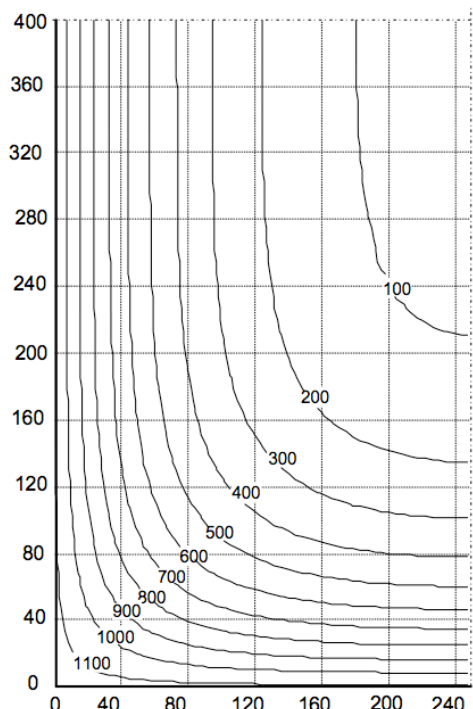


R120

Fig.A2.7 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$



R180



R240

Fig.A2.8 – Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$

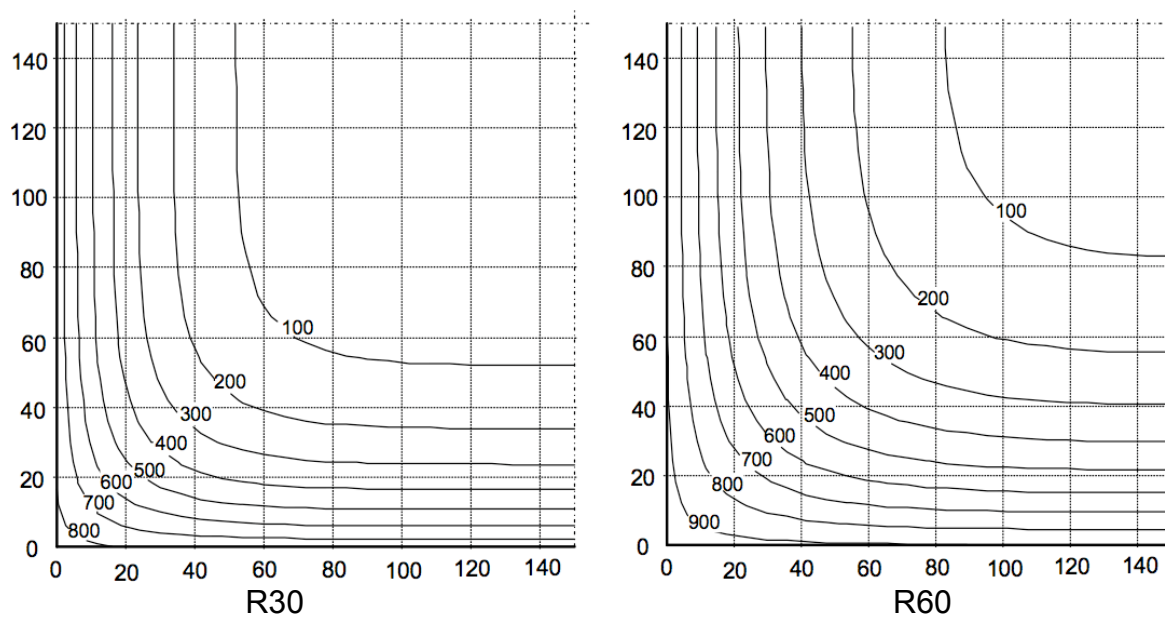


Fig.A2.9 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar, $h \times b = 300 \times 300$

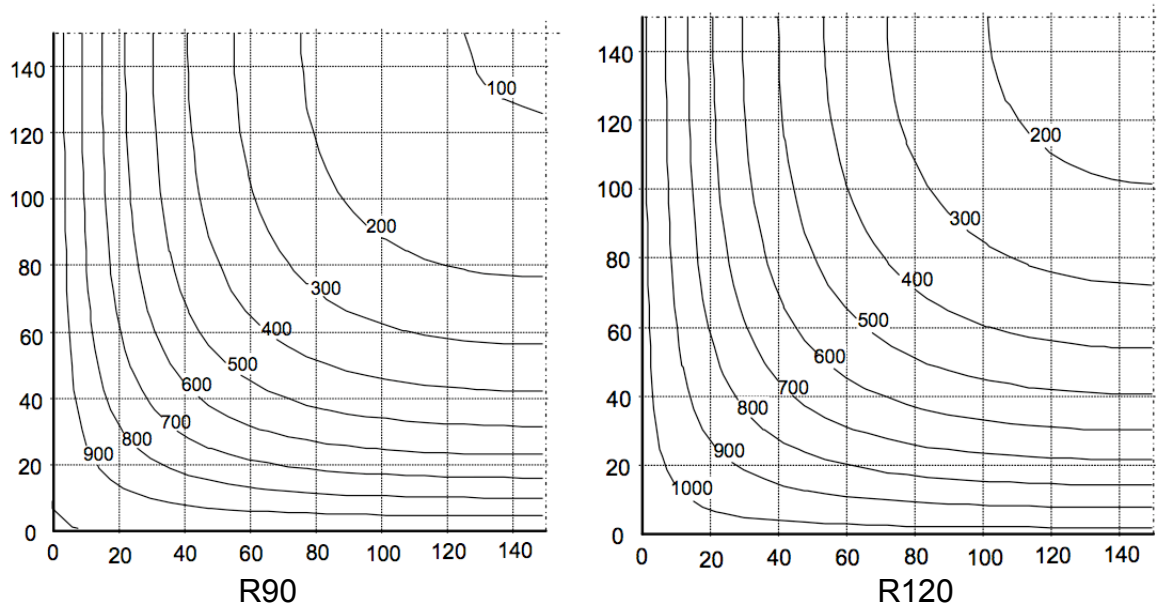


Fig.A2.10 – Perfis de temperatura (°C) para um pilar, $h \times b = 300 \times 300$

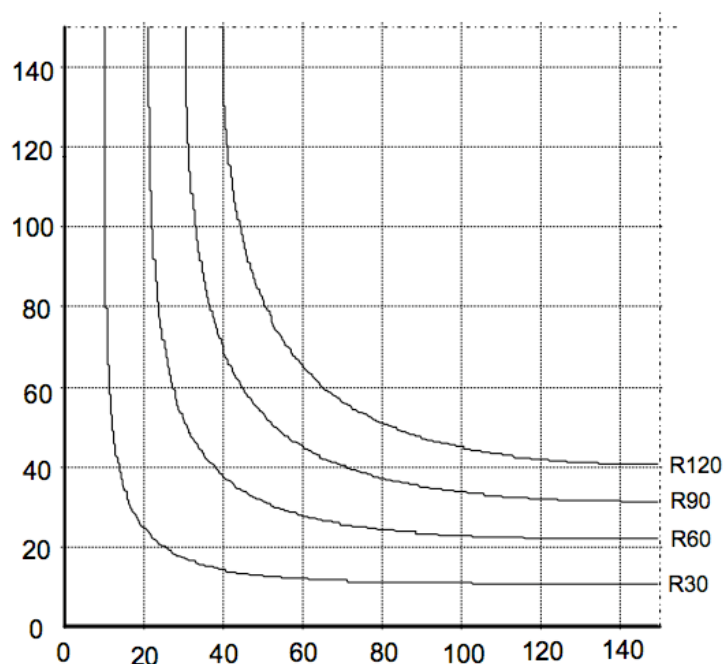
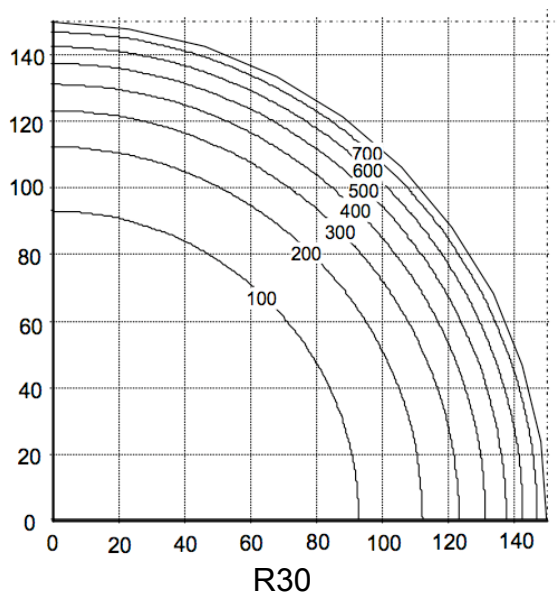
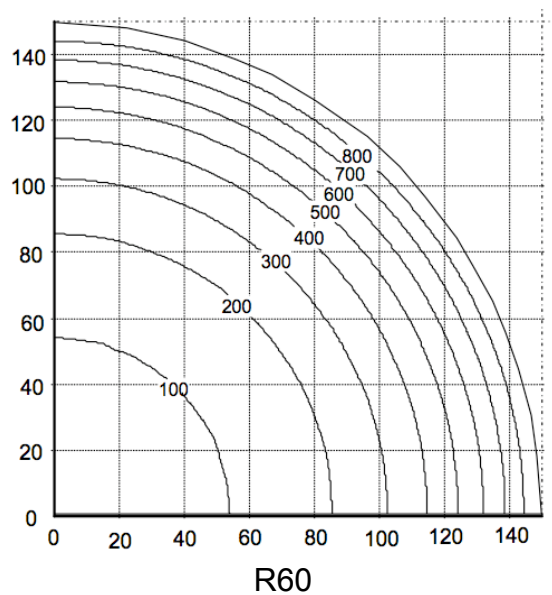


Fig.A2.11 – Isotérmica de 500°C para um pilar, $h \times b = 300 \times 300$



R30



R60

Fig.A2.12 – perfis de temperatura (°C) para um pilar circular, diâmetro 300

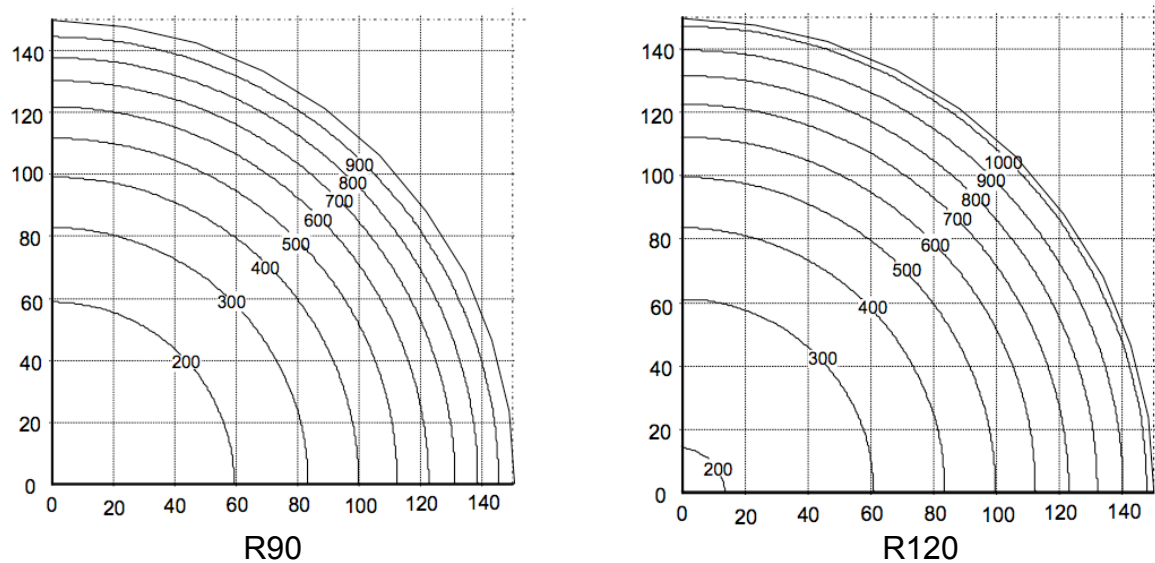


Fig.A2.13 – perfis de temperatura (°C) para um pilar circular, diâmetro 300

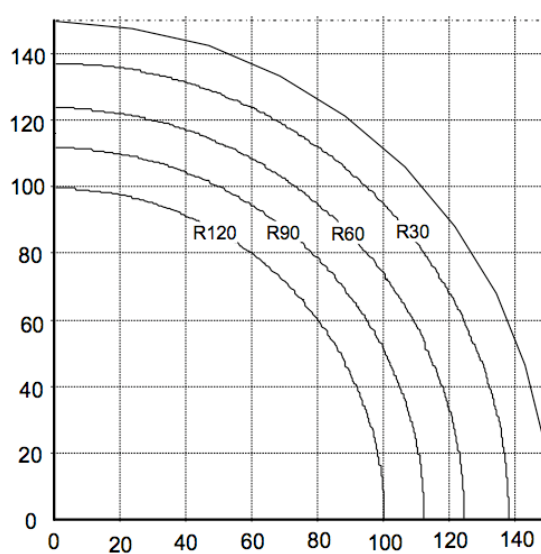


Fig.A2.14 – Isotérmica de 500°C para um pilar circular, diâmetro 300

A3

PROGRAMAS DE CÁLCULO

Neste Anexo são apresentados os programas integrais dos métodos tabelados para vigas contínuas e dos métodos simplificados (Zonas) vigas em momentos positivos.

1. Tabelados vigas contínuas

```
# coding=UTF8
import interface
from interface import data
from interface import results
from interface import iface

table1 = {
    30:((80,25),(120,20),(160,15),(200,15)),
    60:((120,40),(160,35),(200,30),(300,25)),
    90:((150,55),(200,45),(300,40),(400,35)),
    120:((200,65),(240,60),(300,55),(500,50)),
    180:((240,80),(300,70),(400,65),(600,60)),
    240:((280,90),(350,80),(500,75),(700,70))
}
table2 = {
    30:((80,15),(160,12)),
    60:((120,25),(200,12)),
    90:((150,35),(250,25)),
    120:((200,45),(300,35),(450,35),(500,30)),
    180:((240,60),(400,50),(550,50),(600,40)),
    240:((280,75),(500,60),(650,60),(700,50))
}
def calcFireResistance(rfogo, bi, rec, destrub, darmtrac, resdistr):
    if resdistr == 2:
        table = table2
    else:
        table = table1
```

```

ai = float(rec) + destrib + darmtrac/2
bi = bi * 1000
line = table.get(rfogo)
val1 = ()
val2 = ()

if bi >= line[len(line)-1][0]:
    if ai >= line[len(line) - 1][1]:
        results["resultado"] = "OK"
        results["info"] = "amin =" + str(line[len(line) - 1][1]) + "\nbmin =" +
str(line[len(line)-1][0]) + "\na =" + str(ai) + "\nb =" + str(bi)
        results["amin"] = line[len(line) - 1][1]
        return
    else:
        results["resultado"] = "KO"
        results["info"] = "amin =" + str(line[len(line) - 1][1]) + "\nbmin =" +
str(line[len(line)-1][0]) + "\na =" + str(ai) + "\nb =" + str(bi)
        results["amin"] = line[len(line) - 1][1]
        return
else:
    for cell in line:
        b = cell[0]
        a = cell[1]
        if bi < b:
            if val1 == ():
                results["resultado"] = "KO"
                results["info"] = "amin =" + str(a) + "\nbmin =" + str(b) + "\na =" +
str(ai) + "\nb =" + str(bi)
                results["amin"] = a
                return
            else:
                val2 = (b,a)
                perc = (bi - val1[0]) / float(val2[0] - val1[0])
                b_temp = val1[0] + ((val2[0] - val1[0]) * perc)
                a_temp = val1[1] - ((val1[1] - val2[1]) * perc)

                if ai >= a_temp:
                    results["resultado"] = "OK"
                    results["info"] = "amin =" + str(a_temp) + "\nbmin =" +
str(b_temp) + "\na =" + str(ai) + "\nb =" + str(bi)
                    results["amin"] = a_temp
                    return
                else:
                    results["resultado"] = "KO"

```

```
        results["info"] = "amin =" + str(a_temp) + "\nbmin =" +
str(b_temp) + "\na =" + str(ai) + "\nb =" + str(bi)
        results["amin"] = a_temp
        return

    elif b == bi:
        if ai >= a:
            results["resultado"] = "OK"
            results["info"] = "amin =" + str(a) + "\nbmin =" + str(b) + "\na =" +
str(ai) + "\nb =" + str(bi)
            results["amin"] = a
            return
        else:
            results["resultado"] = "KO"
            results["info"] = "amin =" + str(a) + "\nbmin =" + str(b) + "\na =" +
str(ai) + "\nb =" + str(bi)
            results["amin"] = a
            return
    else:
        val1 = (b,a)

calcFireResistance(data["fogo.t"], data["geometria.b"], data["geometria.rec"], data["estribos.dvaroes"],
data["armtrac.dvaroes"], data["redistribuiçao.delta"])
iface.finish()
```

2. Simplificados (Zonas) vigas em momento positivo

```
# coding=UTF8
import interface
from interface import data
from interface import results
from interface import iface
def calcFireResistancezonasvigasmpositivos(rfogo, b, h, fck, fyk, destrib, armcompn, armcompd,
narm1, darm1, a1, narm2, darm2, a2, rec, l, linf, qk, yii, n, mbetao, lista1, lista2, dados):

    #Alterar valores de inputs de milímetros para metros
    fcd = fck / 1.5
    fyd = fyk / 1.15
    rec = rec * pow(10,-3)
    destrib = destrib * pow(10,-3)
    armcompd = armcompd * pow(10,-3)
    darm1 = darm1 * pow(10,-3)
    darm2 = darm2 * pow(10,-3)
    a1 = a1 * pow(10,-3)
    a2 = a2 * pow(10,-3)
    w = b / 2
```

```
if narm1 == 0 and narm2 == 0:
    results["resultado"] = "Erro, meter armadura"
    results["mrdfi"] = ""
    results["medfi"] = ""
    results["x"] = ""
    results["extinf"] = ""
    results["extsup"] = ""
    results["az"] = ""
    return

#soma do número total de varões inferiores
r = float(narm1) + narm2
#retirar ks em função de temperaturas dos varões inferiores
linha = []

for i in lista1:
    a = lista1.get(i)
    linha.append(a)
    if i >= narm1:
        break

for i in lista2:
    a = lista2.get(i)
    linha.append(a)
    if i >= narm2:
        break

for i in range(len(linha)):
    temp = linha[i]

    if temp <= 400:
        k = 1
    elif temp <= 500:
        k = 1 - (temp - 400) * 0.22 / 100
    elif temp <= 600:
        k = 0.78 - (temp - 500) * 0.31 / 100
    elif temp <= 700:
        k = 0.47 - (temp - 600) * 0.24 / 100
    elif temp <= 800:
        k = 0.23 - (temp - 700) * 0.12 / 100
    elif temp <= 900:
        k = 0.11 - (temp - 800) * 0.05 / 100
    elif temp <= 1200:
        k = 0.06 - (temp - 900) * 0.02 / 100
    else:
        k = 0
```



```
linha[i] = k

line = []

for i in dados:
    z = dados.get(i)
    line.append(z)
    if i >= n:
        break

for i in range(len(line)):
    temp = line[i]

    if temp <= 100:
        kc = 1
    elif temp <= 200:
        kc = 1 - 0.05 * (temp - 100) / 100
    elif temp <= 300:
        kc = 0.95 - 0.1 * (temp - 100) / 200
    elif temp <= 400:
        kc = 0.85 - 0.1 * (temp - 100) / 300
    elif temp <= 500:
        kc = 0.75 - 0.15 * (temp - 100) / 400
    elif temp <= 600:
        kc = 0.6 - 0.15 * (temp - 100) / 500
    elif temp <= 700:
        kc = 0.45 - 0.15 * (temp - 100) / 600
    elif temp <= 800:
        kc = 0.3 - 0.15 * (temp - 100) / 700
    elif temp <= 900:
        kc = 0.15 - 0.07 * (temp - 100) / 800
    elif temp <= 1000:
        kc = 0.08 - 0.04 * (temp - 100) / 900
    elif temp <= 1100:
        kc = 0.04 - 0.03 * (temp - 100) / 1000
    elif temp <= 1200:
        kc = 0.01 - 0.01 * (temp - 100) / 1100
    else:
        kc = 0
    line[i] = kc

if mbetao <= 100:
    kcmb = 1
elif mbetao <= 200:
    kcmb = 1 - 0.05 * (mbetao - 100) / 100
elif mbetao <= 300:
    kcmb = 0.95 - 0.1 * (mbetao - 100) / 200
```

```

elif mbetao <= 400:
    kcmb = 0.85 - 0.1 * (mbetao - 100) / 300
elif mbetao <= 500:
    kcmb = 0.75 - 0.15 * (mbetao - 100) / 400
elif mbetao <= 600:
    kcmb = 0.6 - 0.15 * (mbetao - 100) / 500
elif mbetao <= 700:
    kcmb = 0.45 - 0.15 * (mbetao - 100) / 600
elif mbetao <= 800:
    kcmb = 0.3 - 0.15 * (mbetao - 100) / 700
elif mbetao <= 900:
    kcmb = 0.15 - 0.07 * (mbetao - 100) / 800
elif mbetao <= 1000:
    kcmb = 0.08 - 0.04 * (mbetao - 100) / 900
elif mbetao <= 1100:
    kcmb = 0.04 - 0.03 * (mbetao - 100) / 1000
elif mbetao <= 1200:
    kcmb = 0.01 - 0.01 * (mbetao - 100) / 1100
else:
    kcmb = 0

```

#sumatorio dos kc

x = 0

sumkc = 0

for cell in line:

 kc = cell

 x = x + 1

 sumkc = sumkc + kc

#cálculo do kcm

kcmed = ((1 - 0.2 / n) / n) * float(sumkc)

az = w * (1 - (kcmed / kcmb))

beq = b - 2 * az

if narm2 == 0:

 am = a1

elif narm1 == 0:

 am = a2

else:

 am = float(pow((a1 * a2),0.5))

deq = h - am

#caso 1 fck

Cálculo de Mrd

xrd1 = ((narm1 * fyd * pow((darm1 / 2),2) * 3.141592654) + (narm2 * fyd * pow((darm2 / 2),2) * 3.141592654) - (armcompn * fcd * pow((armcompd / 2),2) * 3.141592654)) / (0.8 * fcd * b)

```

Mrd1 = (0.8 * fcd * b) * xrd1 * (deq - 0.4 * xrd1) + (armcompn * fcd * pow((armcompd / 2 ),2)
* 3.141592654) * (deq - rec - destrib - armcompd / 2)

# Cálculo de Medfi
psd1 = Mrd1 * 8 / pow(1,2)
qk1 = qk * linf
gk1 = psd1 - 1.5 * qk1 / 1.35
nfi1 = (gk1 + yii * qk1) / (1.35 * gk1 + 1.5 * qk1)
Medfi1 = nfi1 * Mrd1

#calcular fyk(força dos varoes) para total dos varoes
fykfogo = 0
x = 0
for cell in linha:
    ks = cell
    x = x + 1

    if x <=narm1:
        fykfogo = (ks * fyk * pow((darm1 / 2 ),2) * 3.141592654) + fykfogo
    else:
        fykfogo = (ks * fyk * pow((darm2 / 2 ),2) * 3.141592654) + fykfogo

#calcular M e x e exti e exts
x1 = (fykfogo - (armcompn * fck * pow((armcompd / 2 ),2) * 3.141592654)) / (0.8 * fck * beq)

if (h - az) < x1:
    x1 = (h - az)

M1 = (0.8 * fck * beq) * x1 * (deq - 0.4 * x1) + (armcompn * fck * pow((armcompd / 2 ),2) *
3.141592654) * (deq - rec - destrib - armcompd / 2)

x1 = x1 + 0.000000000000000001

exti1 = ((deq - x1) / x1) * 0.0035

exts1 = ((x1 - rec - destrib - armcompd/2 ) / x1) * 0.0035

#caso 2 fyk

xrd2 = ((narm1 * fyd * pow((darm1 / 2 ),2) * 3.141592654) + (narm2 * fyd * pow((darm2 / 2
),2) * 3.141592654) - (armcompn * fyd * pow((armcompd / 2 ),2) * 3.141592654)) / (0.8 * fcd * b)
Mrd2 = (0.8 * fcd * b) * xrd2 * (deq - 0.4 * xrd2) + (armcompn * fyd * pow((armcompd / 2 ),2)
* 3.141592654) * (deq - rec - destrib - armcompd / 2)

# Cálculo de Medfi
psd2 = Mrd2 * 8 / pow(1,2)
qk2 = qk * linf

```

```
gk2 = psd2 - 1.5 * qk2 / 1.35
nfi2 = (gk2 + yii * qk2) / (1.35 * gk2 + 1.5 * qk2)
Medfi2 = nfi2 * Mrd2
```

```
#calcular M e x e exti e exts
```

```
x2 = (fykfogo - (armcompn * fyk * pow((armcompd / 2 ),2) * 3.141592654)) / (0.8 * fck * beq)
```

```
if (h - az) < x2:
    x2 = (h - az)
```

```
M2 = (0.8 * fck * beq) * x2 * (deq - 0.4 * x2) + (armcompn * fyk * pow((armcompd / 2 ),2) *
3.141592654) * (deq - rec - destrib - armcompd / 2)
```

```
x2 = x2 + 0.000000000000000001
```

```
exti2 = ((deq - x2) / x2) * 0.0035
```

```
exts2 = ((x2 - rec - destrib - armcompd/2 ) / x2) * 0.0035
```

```
if M2 >= Medfi2 and M2 > M1 and x > 0:
```

```
    M = M2
    Medfi = Medfi2
    x = x2
    exti = exti2
    exts = exts2
```

```
else:
```

```
    M = M1
    Medfi = Medfi1
    x = x1
    exti = exti1
    exts = exts1
```

```
#verificacao
```

```
if exti >= (20 / 1000):
```

```
    if M >= Medfi:
        results["resultado"] = "OK"
        results["mrdfi"] = M
        results["medfi"] = Medfi
        results["x"] = x
        results["extinf"] = exti
        results["extsup"] = exts
        results["az"] = az * pow(10,3)
        return
```

```
    else:
```

```
        results["resultado"] = "KO"
        results["mrdfi"] = M
```

```
        results["medfi"] = Medfi
        results["x"] = x
        results["extinf"] = exti
        results["extsup"] = exts
        results["az"] = az * pow(10,3)
        return
    else:
        #retirar ks em função de temperaturas dos varoes inferiores
        linha = []

        for i in lista1:
            a = lista1.get(i)
            linha.append(a)
            if i >= narm1:
                break

        for i in lista2:
            a = lista2.get(i)
            linha.append(a)
            if i >= narm2:
                break

        for i in range(len(linha)):
            temp = linha[i]

            if temp <= 100:
                k = 1
            elif temp <= 400:
                k = 0.7 - 0.3 * (temp - 400) / 300
            elif temp <= 500:
                k = 0.57 - 0.13 * (temp - 500) / 100
            elif temp <= 700:
                k = 0.1 - 0.47 * (temp - 700) / 200
            elif temp <= 1200:
                k = 0.1 * (1200 - temp) / 500
            else:
                k = 0
            linha[i] = k

        #calcular fyk(força dos varoes) para total dos varoes
        fykfogo = 0
        x = 0
        for cell in linha:
            ks = cell
            x = x + 1

            if x <= narm1:
```

```

        fykfogo = (ks * fyk * pow((darm1 / 2 ),2) * 3.141592654) + fykfogo
    else:
        fykfogo = (ks * fyk * pow((darm2 / 2 ),2) * 3.141592654) + fykfogo

#caso 1 fck

#calcular M e x e exti e exts

x1 = (fykfogo - (armcompn * fck * pow((armcompd / 2 ),2) * 3.141592654)) / (0.8 * fck
* beq)

if (h - az) < x1:
    x1 = (h - az)

M1 = (0.8 * fck * beq) * x1 * (deq - 0.4 * x1) + (armcompn * fck * pow((armcompd / 2
),2) * 3.141592654) * (deq - rec - destrib - armcompd / 2)

x1 = x1 + 0.000000000000000001

exti1 = ((deq - x1) / x1) * 0.0035

exts1 = ((x1 - rec - destrib - armcompd/2 ) / x1) * 0.0035

#caso 2 fyk

x2 = (fykfogo - (armcompn * fyk * pow((armcompd / 2 ),2) * 3.141592654)) / (0.8 * fck
* beq)

if (h - az) < x2:
    x2 = (h - az)

M2 = (0.8 * fck * beq) * x2 * (deq - 0.4 * x2) + (armcompn * fyk * pow((armcompd / 2
),2) * 3.141592654) * (deq - rec - destrib - armcompd / 2)

x2 = x2 + 0.000000000000000001

exti2 = ((deq - x2) / x2) * 0.0035

exts2 = ((x2 - rec - destrib - armcompd/2 ) / x2) * 0.0035

if M2 >= Medfi2 and M2 > M1 and x > 0:
    M = M2
    Medfi = Medfi2
    x = x2
    exti = exti2
    exts = exts2
else:

```

```
M = M1
Medfi = Medfi1
x = x1
exti = exti1
exts = exts1

#verificação
if M >= Medfi:
    results["resultado"] = "OK"
    results["mrdfi"] = M
    results["medfi"] = Medfi
    results["x"] = x
    results["extinf"] = exti
    results["extsup"] = exts
    results["az"] = az * pow(10,3)
    return
else:
    results["resultado"] = "KO"
    results["mrdfi"] = M
    results["medfi"] = Medfi
    results["x"] = x
    results["extinf"] = exti
    results["extsup"] = exts
    results["az"] = az * pow(10,3)
    return

#buscar valores variáveis de armadura
keys = [x for x in data.keys() if x.startswith("calculoaz.t")]
r = [int(x[11:]) for x in keys]
t = [data[x] for x in keys]
dados = dict(zip(r,t))

#buscar valores variáveis de temp da armadura
keys = [x for x in data.keys() if x.startswith("armtrac1.t")]
k1 = [int(x[10:]) for x in keys]
v1 = [data[x] for x in keys]
lista1 = dict(zip(k1,v1))
keys = [x for x in data.keys() if x.startswith("armtrac2.t")]
k2 = [int(x[10:]) for x in keys]
v2 = [data[x] for x in keys]
lista2 = dict(zip(k2,v2))

calcFireResistancezonasvigasmpositivos(data["fogo.t"], data["geometria.b"], data["geometria.h"],
data["resistencias.fck"], data["resistencias.fyk"], data["estribos.n"], data["armcomp.nvaroes"],
data["armcomp.dvaroes"], data["armtrac.nvaroes1nivel"], data["armtrac.dvaroes1nivel"],
data["armtrac.a1"], data["armtrac.nvaroes2nivel"], data["armtrac.dvaroes2nivel"], data["armtrac.a2"],
```

```
data["geometria.rec"], data["geometria.l"], data["geometria.linf"], data["forcas.cargavariavel"],  
data["forcas.coeficientefrequente"], data["calculoaz.nseccoes"], data["calculoaz.atempmed2"], lista1,  
lista2, dados)  
iface.finish()
```


A4

CÁLCULO DA ESTRUTURA EM ESTUDO

Neste Anexo são apresentados os resultados completos da verificação da estrutura em estudo no capítulo 6.

R90	REC = 2,5 cm	Piso	Laje	repetições	LX (m)	LY (m)	L de Descarga (m)	h (m)	Arm. Tração	Arm. Distrib	Resultado	h _{min} (mm)	a _{min} (mm)	h (mm)	a (mm)	Resultado	M _{rd} (KN.m)	M _{ed,fi} (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a ₅₀₀ (mm)	
		Tecto Sub-Cave	LE1	1			4	0,2	7d12	6d6	OK	100	15	200	31								
			LE2	1			4,8	0,2	7d12	6d6	OK	100	15	200	31								
			LM5	1			3,5	0,2	8d12	7d6	OK	100	15	200	31								
		Tecto da Cave	LE1	1			4	0,3	7d12	6d6	OK	100	15	300	31								
			LE2	1			4,8	0,2	7d12	6d6	OK	100	15	200	31								
			LM5	1			3,5	0,2	8d12	7d6	OK	100	15	200	31								
		Tecto do R/Chão	LM5	1			3,5	0,2	8d12	7d6	OK	80	10	200	31								
			LM2	1	14,9	1,2	1,2	0,2	8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	33	0,0161	0,03235	-	30	
			LM7	2	15,5				8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	15,981	0,0161	0,03235	-	30	
			LM3	2	1	3,9	1		8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	35,966	0,0161	0,03235	-	30	
		Tecto do 1ºAndar	LM5	1			3,5	0,2	8d12	7d6	OK	80	10	200	31								
			LM2	1	14,9	1,2	1,2	0,2	8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	33	0,0161	0,03235	-	30	
			LM7	2	15,5				8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	15,981	0,0161	0,03235	-	30	
			LM3	2	1	3,9	1		8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	35,966	0,0161	0,03235	-	30	
		Tecto do 2ºAndar	LM5	1			3,5	0,2	8d12	7d6	OK	80	10	200	31								
			LM2	1	14,9	1,2	1,2	0,2	8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	33	0,0161	0,03235	-	30	
			LM7	2	15,5				8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	15,981	0,0161	0,03235	-	30	
			LM3	2	1	3,9	1		8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	35,966	0,0161	0,03235	-	30	
		Tecto do 3ºAndar	LM5	1			3,5	0,2	8d12	7d6	OK	80	10	200	31								
			LM2	1	14,9	1,2	1,2	0,2	8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	33	0,0161	0,03235	-	30	
			LM7	2	15,5				8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	15,981	0,0161	0,03235	-	30	
			LM3	2	1	3,9	1		8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	35,966	0,0161	0,03235	-	30	
		Tecto do 4ºAndar	LM5	1			3,5	0,2	8d12	7d6	OK	80	10	200	31								
			LM2	1	14,9	1,2	1,2	0,2	8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	33	0,0161	0,03235	-	30	
			LM7	2	15,5				8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	15,981	0,0161	0,03235	-	30	
			LM3	2	1	3,9	1		8d12	7d6	Não aplicável					OK	51.072	35,966	0,0161	0,03235	-	30	

Vigas de A na direcção Y											Métodos Tabelados	Método da Isotérmica 500°C						Método das Zonas							
Portico	Piso	Viga	Parte	Vão (m)	b (m)	h (m)	Armadura superior	Armadura inferior	Estribos	Resultado	Resultado	M _{rd,fi} (KN.m)	M _{ed,fi} (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a ₅₀₀ (mm)	Resultado	M _{rd,fi} (KN.m)	M _{ed,fi} (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a _z (mm)	
Py1A	1	VA1	1	4,2	0,4	0,5	2d12	4d12	d6/0,125(2)	OK															
			2	4	0,4	0,5	2d12	4d12	d6/0,125(2)	OK															
			3	3,3	0,2	0,7	2d12	4d12	d6/0,250	KO	OK	80,2	71,24	0,047	0,04563	0,00076	37								
			4	4,5	0,3	0,5	2d12	4d12	d6/0,150(2)	KO	OK	56,23	45,95	0,026	0,058	0,0014	37								
		VA2	1	4,2	0,4	0,5	2d12	4d12	d6/0,125(2)	OK															
			2	4	0,4	0,5	2d12	4d12	d6/0,125(2)	OK															
			3	3,3	0,2	0,7	2d12	4d12	d6/0,250	KO	OK	80,2	71,24	0,047	0,04563	0,00076	37								
			4	4,5	0,3	0,5	2d12	2d12	d6/0,150(2)	KO	OK	56,23	45,95	0,026	0,058	0,0014	37								
		VA3	1	4,2	0,4	0,5	2d12	5d12	d6/0,125(2)	OK															
			2	4	0,4	0,5	2d12	5d12	d6/0,125(2)	OK															
			3	3,3	0,3	0,5	2d12	2d12	d6/0,150(2)	KO	OK	32,136	21,53	0,0127	0,1243	0,0067	22								
			4	4,5	0,3	0,5	2d12	2d12	d6/0,150(2)	KO	OK	32,136	17,297	0,0127	0,1243	0,0067	22								
		VA4	1	4,2	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	82,4	0,0383	0,03868	0,0001142	22								
			2	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	82,4	0,0383	0,03868	0,0001142	22								
			3	3,3	0,2	0,7	2d12 + 1d16	2d12	d6/0,200	KO	OK	181,32	125,9	0,0483	0,044	0,00082	22								
			4	4,5	0,3	0,5	2d12	2d12	d6/0,150(2)	KO	OK	32,14	17,3	0,0126	0,124	0,0067	22								
		VA5	1	4,2	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	82,4	0,0383	0,03868	0,0001142	22								
			2	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	82,4	0,0383	0,03868	0,0001142	22								
			3	3,3	0,3	0,5	2d12 + 1d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,987	129,39	0,063	0,033	0,00144	22								
			4	4,5	0,3	0,5	2d12	2d12	d6/0,150(2)	KO	OK	32,14	17,3	0,0126	0,124	0,0067	22								
		VA6	1	4,2	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	82,4	0,0383	0,03868	0,0001142	22								
			2	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	82,4	0,0383	0,03868	0,0001142	22								
			3	3,3	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,200	KO	OK	180,987	129,39	0,063	0,033	0,00144	22								
			4	4,5	0,3	0,5	2d16	2d12	d6/0,150(2)	KO	OK	32,14	17,3	0,0126	0,124	0,0067	22								
VA7	1	4,2	0,3	0,5	2d12	5d16	d6/0,150(2)	KO	OK	159,8	103,83	0,054	0,0264	0,0011	22										
	2	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	82,4	0,0383	0,03868	0,0001142	22										
	3	3,3	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,200	KO	OK	180,987	129,39	0,063	0,033	0,00144	22										
	4	4,5	0,3	0,5	2d16	2d12	d6/0,150(2)	KO	OK	32,14	17,3	0,0126	0,124	0,0067	22										
VA8	1	1	0,3	0,5	4d12	4d12	d6/0,150(2)	KO	OK	72,4	52,644	0,029	0,052	0,000928	22										
	2	4	0,3	0,5	2d12	5d12	d6/0,150(2)	KO	OK	92,123	57,36	0,038	0,039	0,000099	22										
	3	3,3	0,2	0,7	2d12	4d12	d6/0,250	KO	OK	103,47	69,6	0,0498	0,043	0,000899	22										
	4	4,5	0,2	0,7	2d12	3d12	d6/0,150(2)	KO	OK	52,46	30,73	0,0215	0,0718	0,000242	22										
Py2A	1	VA9	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	140,1	130,5	0,024	0,0927	0,0021	37								
			2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	140,1	130,18	0,024	0,0927	0,0021	37								
			3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	109,61	107,53	0,095	0,0134	0,0021	37								
			4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	140,1	130,5	0,024	0,0927	0,0021	37								
		VA10	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	140,1	130,5	0,024	0,0927	0,0021	37								
			2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	140,1	130,18	0,024	0,0927	0,0021	37								
			3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	109,61	107,53	0,095	0,0134	0,0021	37								
			4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	140,1	130,5	0,024	0,0927	0,0021	37								
		VA11	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
			2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,29	0,04	0,054	0,0001	22								
			3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	160,4	107,8	0,0177	0,08768	0,00423	22								
			4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
		VA12	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
			2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,29	0,04	0,054	0,0001	22								
			3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	160,4	107,8	0,0177	0,08768	0,00423	22								
			4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
		VA13	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
			2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,29	0,04	0,054	0,0001	22								
			3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	160,4	107,8	0,0177	0,08768	0,00423	22								
			4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
		VA14	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
			2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,29	0,04	0,054	0,0001	22								
			3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	160,4	107,8	0,0177	0,08768	0,00423	22								
			4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22								
VA15	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22										
	2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,29	0,04	0,054	0,0001	22										
	3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	160,4	107,8	0,0177	0,08768	0,00423	22										
	4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22										
VA16	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22										
	2	1,8	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	KO	OK	180,96	129,29	0,04	0,054	0,0001	22										
	3	3,5	0,2	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	d6/0,150	KO	OK	160,4	107,8	0,0177	0,08768	0,00423	22										
	4	1	0,2	0,7	2d16	4d16	d6/0,250	OK(η=0,7)	OK	180,96	129,735	0,04	0,054	0,0001	22										
VA17	1	1,5	0,2	0,7	2d16	4d16																			

Vigas de B na direcção X										Métodos Tabelados	Método da Isotérmica 500°C						Método das Zonas								
Portico	Piso	Viga	Parte	Vão (m)	b (m)	h (m)	Armadura superior	Armadura inferior	Estribos	Resultado	Resultado	M _{rd,fi} (KN.m)	M _{ed,fi} (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a ₅₀₀ (mm)	Resultado	M _{rd,fi} (KN.m)	M _{ed,fi} (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a _z (mm)	
REC = 2,5cm	Px1B	3	VB41	1	3,3	0,4	0,5	4d12	5d16	d6/0,125(2)	OK														
				2	3,7	0,4	0,5	2d12	5d16	d6/0,125(2)	OK														
				3	4,2	0,4	0,5	2d12	5d16	d6/0,125(2)	OK														
				4	2,7	0,4	0,5	4d12	5d16	d6/0,125(2)	OK														
				5	3,7	0,4	0,5	4d12	5d16	d6/0,125(2)	OK														
		4	VB42	6	3,1	0,4	0,5	2d12 + 2d16	5d16	d6/0,125(2)	KO	OK	158,89	105,71	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				7	3,3	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	104,45	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				8	3,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	104,45	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				9	4,2	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	102,6583	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				10	2,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	107,34	0,0677	0,0203	0,0015	22							
		5	VB43	11	3,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	106,3	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				12	3,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	104,45	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				13	4,2	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	102,6583	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				14	2,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	107,34	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				15	3,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	104,45	0,0677	0,0203	0,0015	22							
		6	VB44	16	3,1	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	106,3	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				17	3,3	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	105,71	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				18	3,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	104,45	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				19	4,2	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	102,6583	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				20	2,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	107,34	0,0677	0,0203	0,0015	22							
		7	VB45	21	3,3	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	106,3	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				22	3,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	104,45	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				23	4,2	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	102,6583	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				24	2,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	107,34	0,0677	0,0203	0,0015	22							
				25	3,7	0,3	0,5	4d16	5d16	d6/0,200(2)	KO	OK	158,89	104,45	0,0677	0,0203	0,0015	22							
	Px2B	1	VB46	1	3,7	0,4	0,5	2d12	4d12	d6/0,125(2)	OK														
				2	3,1	0,4	0,5	2d12	4d12	d6/0,125(2)	OK														
		2	VB47	1	3,7	0,4	0,5	2d12	4d12	d6/0,125(2)	OK														
				2	3,1	0,4	0,5	2d12	5d16	d6/0,125(2)	OK														
		1	VB48	1	3	0,4	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	OK														
				2	3	0,4	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	OK														
				3	5	0,4	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	OK														
		2	VB49	1	3	0,4	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	OK														
				2	3	0,4	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	OK														
				3	5	0,4	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	OK														
	4			4	0,4	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	OK															
	Px3B	3	VB50	1	1,9	0,4	0,5	3d12	4d16	d6/0,125(2)	OK														
				2	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	KO	OK	125,64	74,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
				3	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,125(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				4	1,9	0,3	0,5	3d12	4d16	d6/0,125(2)	KO	OK	125,64	88,17	0,054	0,0262	0,0011	22							
				5	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	74,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
		4	VB51	1	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	79,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
				2	5	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				3	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				4	1,9	0,3	0,5	3d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	88,17	0,054	0,0262	0,0011	22							
				5	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	74,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
		5	VB52	1	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	79,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
				2	5	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				3	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				4	1,9	0,3	0,5	2d12 + 1d16	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	88,17	0,054	0,0262	0,0011	22							
				5	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	74,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
		6	VB53	1	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	79,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
				2	5	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				3	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				4	1,9	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	88,74	0,038	0,038	0,00011	22							
				5	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	74,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
		7	VB54	1	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	79,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
				2	5	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				3	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22							
				4	1,9	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	88,74	0,038	0,038	0,00011	22							
				5	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	74,1	0,038	0,0386	0,00011	22							
	8	VB55	1	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	79,1	0,038	0,0386	0,00011	22								
			2	5	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22								
			3	4	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	83,13	0,038	0,0386	0,00011	22								
			4	1,9	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	88,74	0,038	0,038	0,00011	22								
			5	6	0,3	0,5	2d12	4d16	d6/0,150(2)	KO	OK	125,64	74,1	0,038	0,0386	0,00011	22								
	Px4B	1	VB56	1	0,4	0,2	1	2d12	3d12	d6/0,250(2)	KO	KO	79,16	82,58	0,										

REC = 2,5cm

Vigas de B na direção Y										Métodos Tabelados	Método da Isotérmica 500°C							Método das Zonas								
Portico	Piso	Viga	Parte	Vão (m)	b (m)	h (m)	Armadura superior	Armadura inferior	Estrêbs	Resultado	Resultado	M _{d,n} (KN.m)	M _{ed,n} (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a _{soo} (mm)	Resultado	M _{d,n} (KN.m)	M _{ed,n} (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a _z (mm)		
Py1B	3	VB1	1	4,2	0,4	0,5	2d12	2d16	6d16	de/(0,125(2))	OK															
			2	4	0,4	0,5	2d12 + 2d16	5d16	de/(0,125(2))	OK																
			3	3,3	0,4	0,5	2d12	5d16	de/(0,125(2))	OK																
		VB2	4	3,5	0,4	0,5	2d12 + 2d16	4d16	de/(0,125(2))	OK																
			5	5	0,4	0,5	2d12	5d16	de/(0,125(2))	OK																
			6	5	0,4	0,5	2d12	4d16	de/(0,125(2))	OK																
	4	VB3	1	4,2	0,3	0,5	2d16 + 1d20	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	125,65	81,86	0,053	0,027	0,00092	22									
			2	4	0,3	0,5	2d16 + 1d20	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	125,65	82,6	0,053	0,027	0,00092	22									
			3	3,3	0,3	0,5	2d16 + 1d20	5d16	de/(0,150(2))	KO	OK	158,82	105,65	0,6868	0,02	0,0015	22									
		VB4	4	3,5	0,3	0,5	2d16 + 1d20	5d16	de/(0,150(2))	KO	OK	158,82	105,03	0,6868	0,02	0,0015	22									
			5	4,2	0,3	0,5	2d16 + 1d20	5d16	de/(0,150(2))	KO	OK	159,48	104,12	0,04	0,0366	0,00011	22									
			6	4	0,3	0,5	2d16 + 1d20	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	125,65	82,6	0,053	0,027	0,00092	22									
Py2B	5	VB5	1	4,2	0,3	0,5	2d16 + 1d20	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	125,65	84,92	0,053	0,0269	0,0009	22									
			2	4	0,3	0,5	2d16 + 1d20	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	125,65	84,3	0,053	0,0269	0,0009	22									
			3	3,3	0,3	0,5	2d16 + 1d20	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	159,48	104,12	0,04	0,0366	0,00011	22									
		VB6	4	3,5	0,3	0,5	2d16 + 1d20	5d16	de/(0,150(2))	KO	OK	159,48	103,6	0,04	0,0366	0,00011	22									
			5	4,2	0,3	0,5	2d16 + 1d20	5d16	de/(0,150(2))	KO	OK	158,8165	105,64	0,069	0,02	0,0015	22									
			6	4,2	0,3	0,5	2d16 + 1d20	5d16	de/(0,150(2))	KO	OK	159,753	103,83	0,054	0,0364	0,0011	22									
	6	VB7	1	4,2	0,3	0,5	2d12 + 1d16	5d16	de/(0,150(2))	KO	OK	159,97	104,95	0,045	0,0323	0,00083	22									
			2	4	0,3	0,5	2d12 + 1d16	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	125,65	84,9	0,054	0,026	0,00111	22									
			3	3,3	0,3	0,5	2d12 + 1d16	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	125,65	84,26	0,054	0,026	0,00111	22									
		VB8	4	3,5	0,3	0,5	2d12	4d16	de/(0,125(2))	OK																
			5	4	0,4	0,5	2d12	4d16	de/(0,125(2))	OK																
			6	3,3	0,4	0,5	2d12	4d16	de/(0,125(2))	OK																
Py3B	1	VB9	1	4,2	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			2	4	0,4	0,5	2d16	4d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			3	3,3	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
		VB10	4	3,5	0,4	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			5	5	0,4	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 3d20	de/(0,125(2))	OK																
			6	5	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
	2	VB11	1	4,2	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			2	4	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
			3	3,3	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
		VB12	4	3,5	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
			5	5	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			6	4	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
Py4B	3	VB13	1	4,2	0,5	0,3	4d16	6d20	de/(0,200(4))	OK																
			2	4	0,5	0,3	4d20	6d20	de/(0,200(4))	OK																
			3	3,3	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
		VB14	4	3,5	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
			5	5	0,4	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			6	4	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
	4	VB15	1	4,2	0,5	0,3	4d20	7d20	de/(0,200(4))	OK																
			2	4	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
			3	3,3	0,5	0,3	4d20	5d20	de/(0,200(4))	OK																
		VB16	4	3,5	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
			5	4	0,5	0,3	4d16	6d16	de/(0,200(4))	OK																
			6	3,3	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
Py5B	5	VB17	1	4,2	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			2	4	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			3	3,3	0,4	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
		VB18	4	3,5	0,4	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
			5	5	0,4	0,5	2d16	2d16 + 4d20	de/(0,125(2))	OK																
			6	5	0,4	0,5	2d16	2d16 + 3d20	de/(0,125(2))	OK																
	6	VB19	1	4,2	0,4	0,5	2d12	4d16	de/(0,125(2))	OK																
			2	4	0,4	0,5	2d12	4d16	de/(0,125(2))	OK																
			3	3,3	0,4	0,5	2d16 + 2d20	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
		VB20	4	3,5	0,4	0,5	2d16	2d16 + 4d20	de/(0,125(2))	OK																
			5	5	0,4	0,5	2d16	2d16 + 3d20	de/(0,125(2))	OK																
			6	5	0,4	0,5	2d16	2d16 + 2d20	de/(0,125(2))	OK																
Py6B	7	VB21	1	4,2	0,5	0,3	4d16	7d16	de/(0,200(4))	OK																
			2	4	0,5	0,3	4d16	6d16	de/(0,200(4))	OK																
			3	3,3	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
		VB22	4	3,5	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
			5	4	0,5	0,3	4d16	6d16	de/(0,200(4))	OK																
			6	3,3	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
	8	VB23	1	4,2	0,5	0,3	4d16	6d16	de/(0,200(4))	OK																
			2	4	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
			3	3,3	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
		VB24	4	3,5	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
			5	4	0,5	0,3	4d16	6d16	de/(0,200(4))	OK																
			6	3,3	0,5	0,3	4d16	5d16	de/(0,200(4))	OK																
Py7b	9	VB25	1	3,3	0,3	0,5	2d12 + 2d16	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	97,84	84,9	0,0465	0,311	0,00072	37									
			2	VB26	1	3,3	0,3	0,5	2d16	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	97,84	84,85	0,0478	0,303	0,00079	37							
			2	VB27	1	3,3	0,3	0,5	2d12	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	97,84	84,87	0,0476	0,301	0,00075	37							
		VB28	3	3,3	0,3	0,5	3d12	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	97,84	84,87	0,0476	0,301	0,00075	37									
			4	VB29	1	3,3	0,3	0,5	3d12	4d16	de/(0,150(2))	KO	OK	97,84	84,87	0,0476	0,301	0,00075	37							
			5	VB30	1	3,3	0,3	0,5	2d12	4d12	de/(0,150(2))	KO	OK	56,26	47,19	0,026	0,058	0,0014	37							
	10	VB31	1	3,3	0,3	0,5	2d12	4d12	de/(0,150(2))	KO	OK	56,26	47,19	0,026	0,058	0,0014	37									
			2	VB32	1	3,3	0,3	0																		

